

Φυσική
Ομάδας Προσανατολισμού
Θετικών Σπουδών

Β΄ τάξη
Γενικού Λυκείου
2ος τόμος

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΡΧΙΚΗΣ ΕΚΔΟΣΗΣ

ΟΜΑΔΑ ΣΥΓΓΡΑΦΗΣ

Ιωάννης Α. Βλάχος, Διδάκτορας, Σχολικός Σύμβουλος
του κλάδου ΠΕ4.

Ιωάννης Γ. Γραμματικάκης, Επικουρος Καθηγητής
Φυσικής στο Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Βασίλης Α. Καραπαναγιώτης, Φυσικός, Καθηγητής
Πειραματικού Σχολείου Πανεπιστημίου Αθηνών.

Περικλής Εμ. Περιστερόπουλος, Φυσικός, Υποψήφιος
Διδάκτορας, Καθηγητής στο 3ο Λύκειο Βύρωνα.

Γιώργος Β. Τιμόθεου, Φυσικός, Λυκειάρχης στο 2ο
Λύκειο Αγ. Παρασκευής.

Αλέκος Ιωάννου
Γιάννης Ντάνος
Άγγελος Πήττας
Σταύρος Ράπτης

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΤΗΣ ΣΥΓΓΡΑΦΙΚΗΣ ΟΜΑΔΑΣ

Παναγιώτης Β. Κόκκοτας, Καθηγητής της Διδακτικής
των Φυσικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Αθηνών.

Οι συγγραφείς ευχαριστούν τον Ιωάννη Βαγιωνάκη,
Φυσικό, για τη συμβολή του στη συγγραφή ασκήσεων
και ερωτήσεων, για τις παρατηρήσεις και υποδείξεις
του, καθώς και για τη βοήθειά του στην επιμέλεια
έκδοσης.

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΚΡΙΣΗΣ

Φλυτζάνης Νικόλαος (Πρόεδρος), Καθηγητής Τμήματος
Φυσικής του Πανεπιστημίου Κρήτης.

Καλοψικάκης Εμμανουήλ, Φυσικός, τ. Σχολικός
Σύμβουλος.

**Ξενάκης Χρήστος, Δρ. Φυσικός, Σχολικός Σύμβουλος
Φθιώτιδος.**

**Πάλλας Δήμος, Φυσικός, Υποδιευθυντής 1ου Λυκείου
Λαμίας.**

**Στεφανίδης Κωνσταντίνος, Δρ. Φυσικός, Σχολικός
Σύμβουλος Πειραιά.**

ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΒΙΒΛΙΟΥ ΓΙΑ ΜΑΘΗΤΕΣ ΜΕ ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΟΡΑΣΗ

Ινστιτούτο Εκπαιδευτικής Πολιτικής (Ι.Ε.Π.)

Μετατροπή: Ιουστίνα Φλεμοτόμου

Επιμέλεια: Γελαστοπούλου Μαρία

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΑΝΕΚΔΟΣΗΣ

Η επανέκδοση του παρόντος βιβλίου πραγματοποιήθηκε από το Ινστιτούτο Τεχνολογίας Υπολογιστών & Εκδόσεων «Διόφαντος» μέσω ψηφιακής μακέτας, η οποία δημιουργήθηκε με χρηματοδότηση από το ΕΣΠΑ / ΕΠ «Εκπαίδευση & Διά Βίου Μάθηση» / Πράξη «ΣΤΗΡΙΖΩ».

Οι αλλαγές που ενσωματώθηκαν στην παρούσα επανέκδοση έγιναν με βάση τις διορθώσεις του Παιδαγωγικού Ινστιτούτου.

**ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ, ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΚΑΙ ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ**

**ΙΩΑΝΝΗΣ Α. ΒΛΑΧΟΣ
ΙΩΑΝΝΗΣ Γ. ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΑΚΗΣ
ΒΑΣΙΛΗΣ Α. ΚΑΡΑΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ
ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Β. ΚΟΚΚΟΤΑΣ
ΠΕΡΙΚΛΗΣ ΕΜ. ΠΕΡΙΣΤΕΡΟΠΟΥΛΟΣ
ΓΙΩΡΓΟΣ Β. ΤΙΜΟΘΕΟΥ**

**ΑΛΕΚΟΣ ΙΩΑΝΝΟΥ
ΓΙΑΝΝΗΣ ΝΤΑΝΟΣ
ΑΓΓΕΛΟΣ ΠΗΤΤΑΣ
ΣΤΑΥΡΟΣ ΡΑΠΤΗΣ**

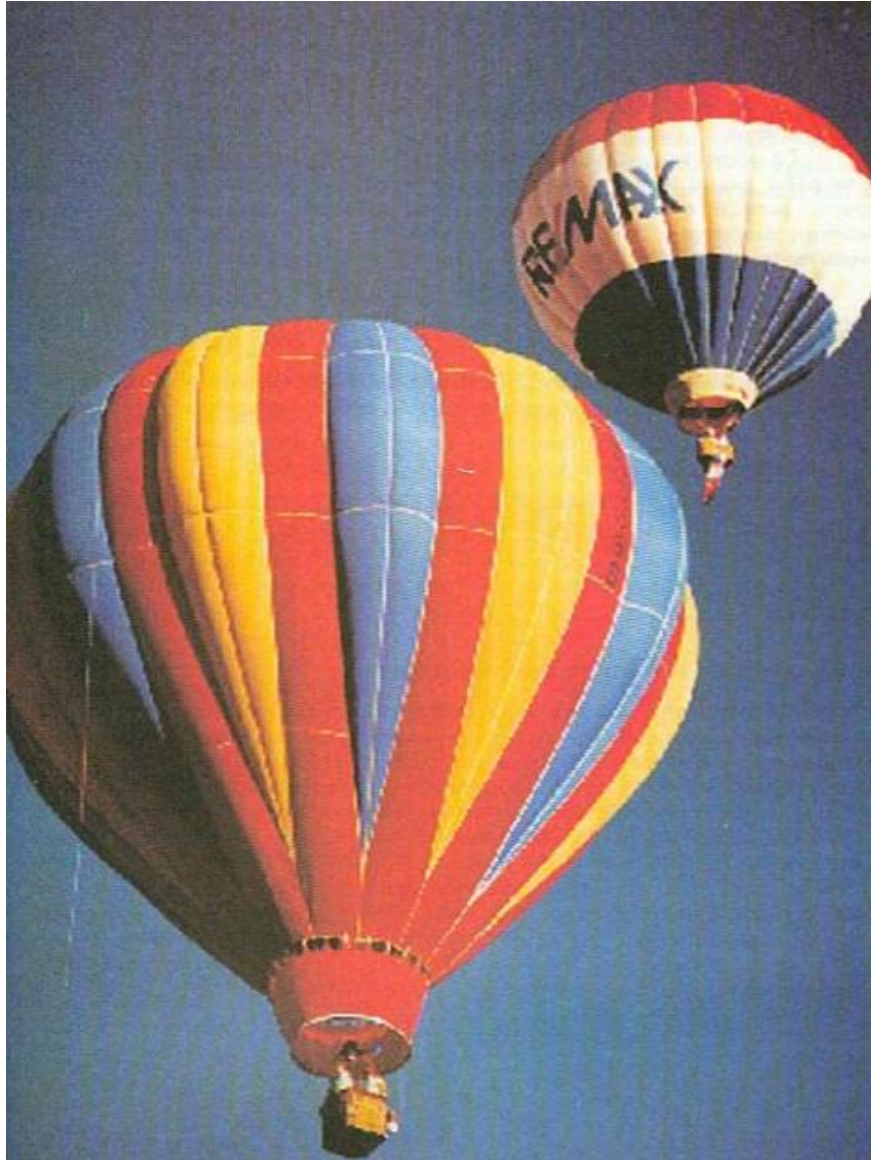
**ΦΥΣΙΚΗ
Ομάδας Προσανατολισμού
Θετικών Σπουδών**

**Β' τάξη Γενικού Λυκείου
2ος τόμος**

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ «ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ»**

3

ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ

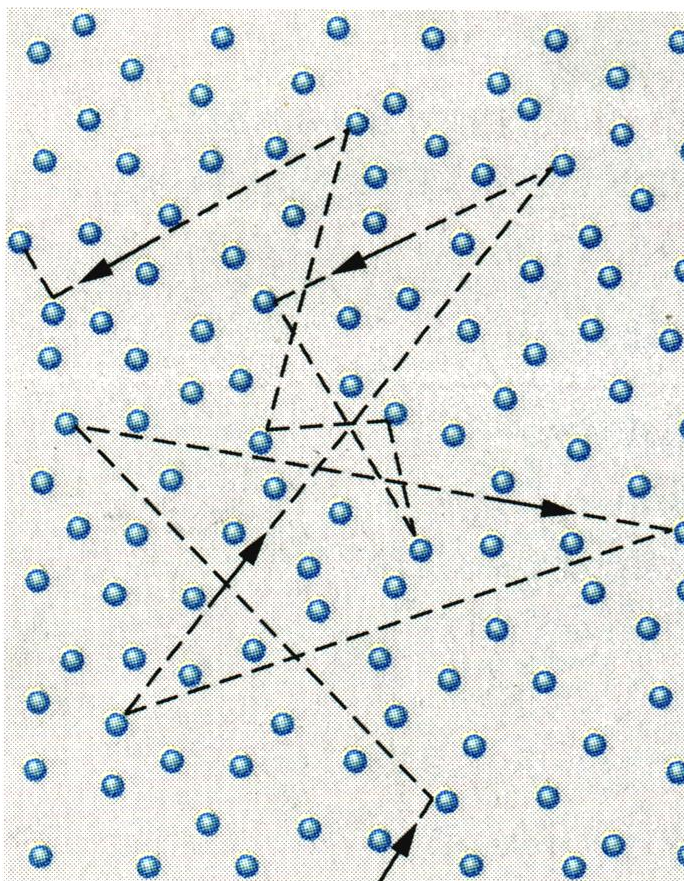


- 3.1 Εισαγωγή
- 3.2 Νόμοι αερίων
- 3.3 Καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων...
- 3.4 Κινητική θεωρία
- 3.5 Τα πρώτα σημαντικά αποτελέσματα
- 3.6 Κατανομή μοριακών ταχυτήτων
- 3.7 Τα συμπεράσματα της κινητικής θεωρίας
έχουν ευρύτερη εφαρμογή

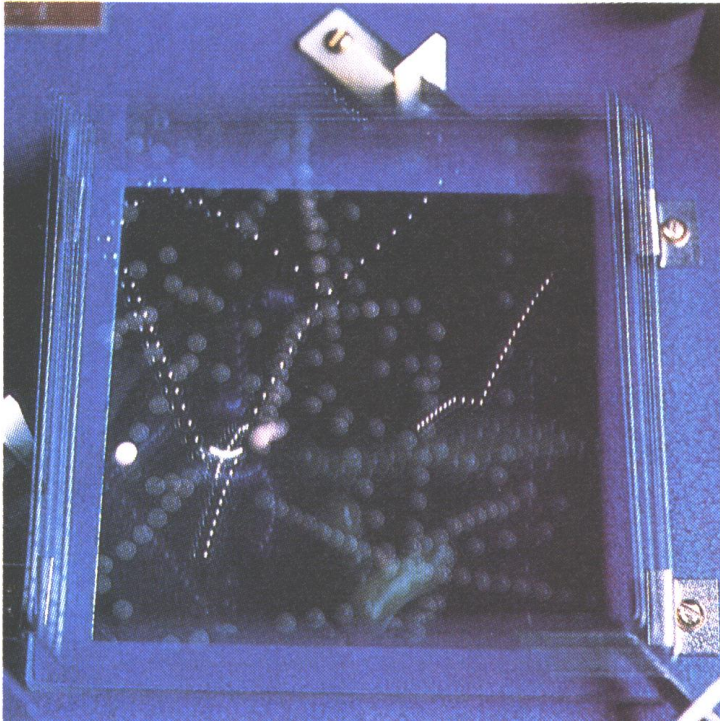
3-1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πολλές από τις σημερινές αντιλήψεις μας για την ύλη και τη θερμότητα έχουν την αφετηρία τους στη μελέτη της συμπεριφοράς των αερίων, για την οποία εργάστηκαν μερικοί από τους πιο σημαντικούς θεωρητικούς και πειραματικούς φυσικούς, στη διάρκεια του αιώνα που πέρασε και στις αρχές του αιώνα μας.

Το ενδιαφέρον για τη συμπεριφορά των αερίων δεν είναι μόνο θεωρητικό. Οι μηχανές των αυτοκινήτων, οι ατμοστρόβιλοι της ΔΕΗ αλλά και μια σειρά από εργαλεία, όπως οι αερόσφυρες (κομπρεσέρ) που χρησιμοποιούμε για να τρυπάμε πέτρες, βασίζουν τη λειτουργία τους σε διαδικασίες στις οποίες συμμετέχουν αέρια.



Εικ. 3.1 Ένα μόριο αερίου κινείται στο χώρο που καταλαμβάνει το αέριο, συγκρούόμενο με άλλα μόρια κατά τη διαδρομή του. Αν και στην εικόνα φαίνονται στατικά, τα άλλα μόρια κινούνται επίσης μ' έναν ανάλογο τρόπο.



Εικ. 3.2 Οι κινήσεις των σφαιριδίων μέσα στο κουτί μοιάζουν με την τυχαία κίνηση των μορίων ενός αερίου.

Στα αέρια οι αποστάσεις μεταξύ των μορίων είναι μεγάλες και οι δυνάμεις μεταξύ τους πολύ μικρές. Αυτό εξηγεί γιατί τα αέρια δεν έχουν δικό τους σχήμα και όγκο αλλά «δανείζονται» το σχήμα και τον όγκο του δοχείου που τα περιέχει.

Τα μόρια των αερίων βρίσκονται σε διαρκή κίνηση και συγκρούονται με τα άλλα μόρια ή με τα τοιχώματα του δοχείου. Η κίνηση των μορίων του αερίου, μεταξύ δύο συγκρούσεων, είναι ευθύγραμμη ομαλή, η «μέση ελεύθερη διαδρομή» τους σχετικά μεγάλη και οι ταχύτητες με τις οποίες κινούνται είναι της τάξης των 1600 χιλιομέτρων την ώρα!

Σε αντίθεση με ό,τι συμβαίνει στα αέρια, τα μόρια των στερεών βρίσκονται σε μικρή μεταξύ τους απόσταση και οι μεταξύ τους δυνάμεις είναι ισχυρές, γι' αυτό τα στερεά έχουν ορισμένο σχήμα και όγκο. Τα μόρια των στερεών δε μετατοπίζονται αλλά ταλαντώνονται γύρω από ορισμένη θέση.

Στην ενδιάμεση κατάσταση, στα υγρά, οι δυνάμεις ανάμεσα στα μόρια είναι σημαντικές, όχι όμως τόσο

μεγάλες όσο στα στερεά, με συνέπεια τα υγρά να έχουν ορισμένο όγκο αλλά όχι δικό τους σχήμα.

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά θα μελετήσουμε τους νόμους που διέπουν τη συμπεριφορά των αερίων, όπως αυτή γίνεται αντιληπτή μακροσκοπικά. Στη συνέχεια θα δούμε πώς, με την υπόθεση ότι τα αέρια αποτελούνται από μόρια στα οποία αποδώσαμε ορισμένες ιδιότητες, καταφέραμε να εξηγήσουμε τη συμπεριφορά τους.

Μακροσκοπική και μικροσκοπική μελέτη.

Η περιγραφή - και κατ' επέκταση η μελέτη ενός φαινομένου - μπορεί να είναι είτε μακροσκοπική είτε μικροσκοπική. Μακροσκοπική λέγεται η μελέτη όταν σ' αυτή δεν υπεισέρχονται υποθέσεις, θεωρίες ή και μεγέθη που έχουν σχέση με τη δομή ή τη σύσταση των αντικειμένων που συμμετέχουν στο φαινόμενο. Στην αντίθετη περίπτωση η μελέτη λέγεται μικροσκοπική.

Για παράδειγμα, αν συνδέσουμε μια λάμπα στους πόλους μιας μπαταρίας η λάμπα θα ανάψει. Το φαινόμενο μπορεί να μελετηθεί αν μετρηθεί η τάση, η ένταση του ρεύματος, η θερμοκρασία του σύρματος της λάμπας, τα ποσά θερμότητας που εκπέμπει κλπ. Αυτή είναι η μακροσκοπική μελέτη. Αν αντίθετα, προσπαθώντας να εξηγήσουμε το φαινόμενο, αναφερθούμε στο είδος των σωματιδίων που κινούνται μέσα στο σύρμα, στην ταχύτητά τους, στις κρούσεις τους κλπ, μελετάμε μικροσκοπικά το φαινόμενο.

Στο χώρο των φυσικών επιστημών η μακροσκοπική και η μικροσκοπική μελέτη των φαινομένων συνήθως συνυπάρχουν. Στα αέρια η μακροσκοπική μελέτη προηγήθηκε της μικροσκοπικής. Στα μέσα του 17ου αιώνα και μετά από μακροσκοπική μελέτη, διατυπώθηκαν οι νόμοι των αερίων από τους Boyle, Charles και

Gay-Lussac. Αργότερα (τέλη του 19ου αιώνα) άρχισε η μικροσκοπική τους μελέτη.

Η μικροσκοπική μελέτη βοήθησε να ερμηνεύσουμε τους μακροσκοπικούς νόμους, να εξηγήσουμε τη συμπεριφορά των αερίων (π.χ. με ποιο μηχανισμό το αέριο δημιουργεί πιέσεις) και, γενικά, να κατανοήσουμε σε βάθος την αέρια φάση.

3-2 ΟΙ ΝΟΜΟΙ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ

Η κατάσταση στην οποία βρίσκεται ένα αέριο περιγράφεται μακροσκοπικά από την πίεση, τον όγκο και τη θερμοκρασία του.

Τα μεγέθη αυτά (πίεση - όγκος - θερμοκρασία) για ορισμένη ποσότητα αερίου δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους αλλά συσχετίζονται. Για παράδειγμα, αν αυξήσουμε τη θερμοκρασία σε μια κλειστή φιάλη που περιέχει αέριο θα αυξηθεί και η πίεση.

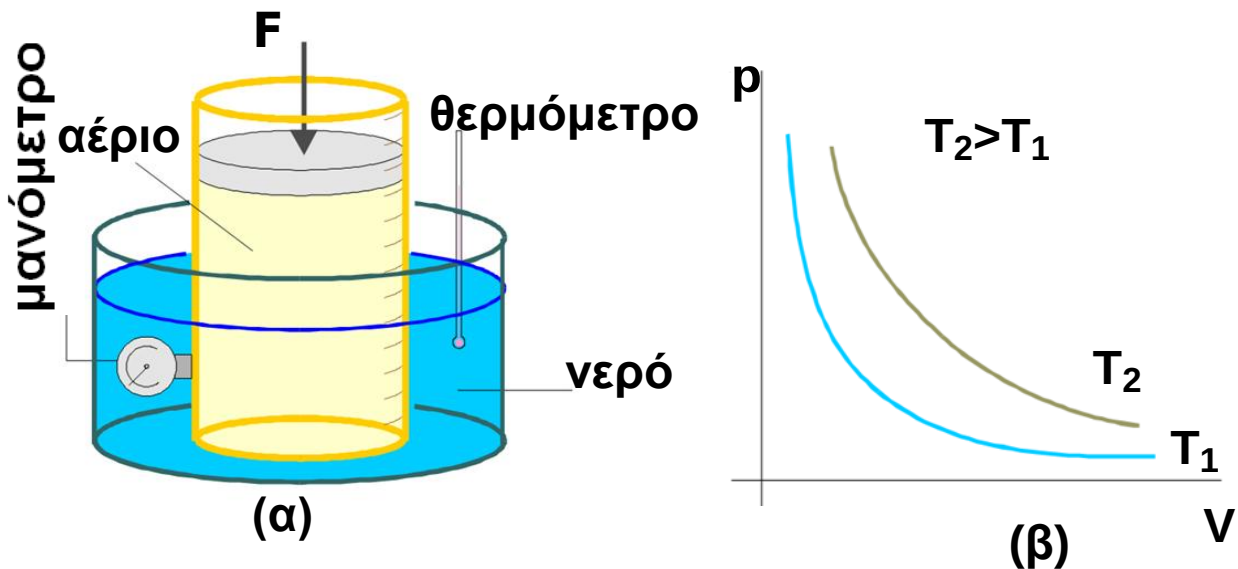
Οι σχέσεις που συνδέουν τα μεγέθη αυτά προσδιορίστηκαν πειραματικά και αποτελούν τους νόμους των αερίων.

Νόμος του Boyle (Μπόιλ, 1627-1691)

Η πίεση ορισμένης ποσότητας αερίου του οποίου η θερμοκρασία παραμένει σταθερή είναι αντίστροφα ανάλογη με τον όγκο του.

Η μαθηματική διατύπωση είναι:

$$p \propto \frac{1}{V} \quad \text{για} \quad T = \text{σταθ.}$$



Σχ. 3.1 (α) Το αέριο βρίσκεται μέσα σε ογκομετρικό δοχείο. Το δοχείο με το αέριο περιβάλλεται από λουτρό με νερό του οποίου η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή. Στο δοχείο υπάρχει προσαρμοσμένο μανόμετρο για τη μέτρηση της πίεσης του αερίου. β) Στο διάγραμμα παριστάνεται γραφικά η πίεση του αερίου σε συνάρτηση με τον όγκο του, για θερμοκρασίες T_1 και T_2 για τις οποίες ισχύει $T_2 > T_1$.

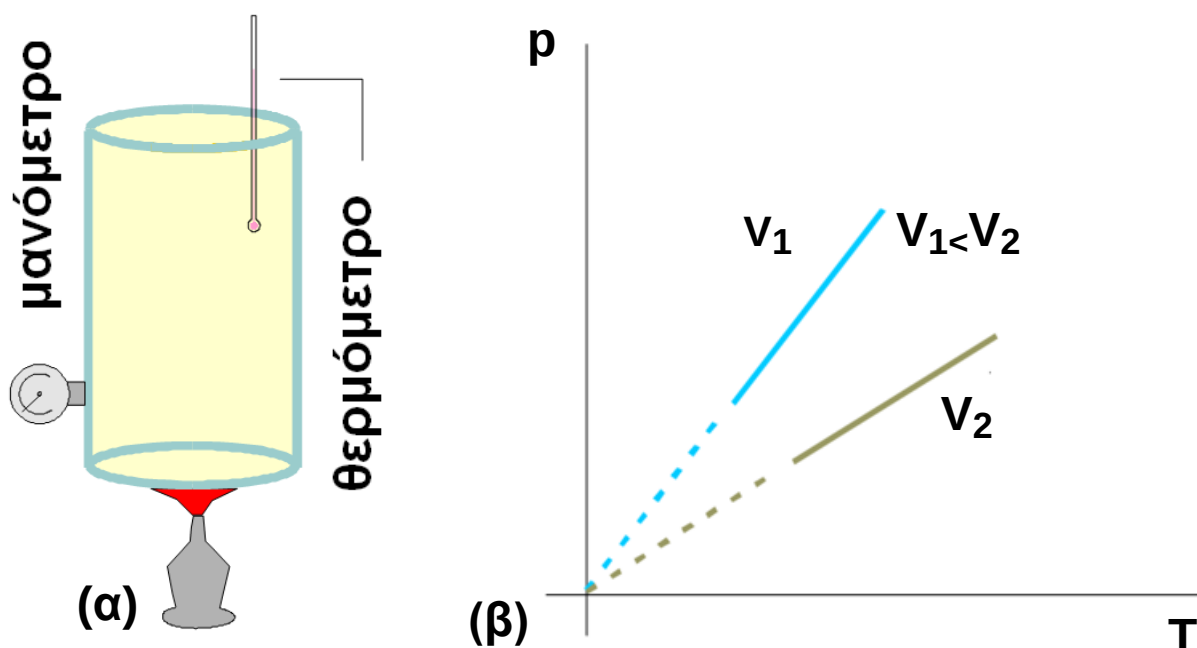
Η μεταβολή στην οποία η θερμοκρασία παραμένει σταθερή ονομάζεται **ισόθερμη**.

Ο νόμος του Charles (Σαρλ, 1746-1823)

Η πίεση ορισμένης ποσότητας αερίου του οποίου ο όγκος διατηρείται σταθερός είναι ανάλογη με την απόλυτη θερμοκρασία του αερίου.

Η μαθηματική του διατύπωση είναι:

$$\frac{p}{T} = \text{σταθ. για } V = \text{σταθ.}$$



Σχ 3.2 α) Το αέριο βρίσκεται μέσα σε δοχείο σταθερού όγκου. Καθώς θερμαίνεται αυξάνεται η πίεσή του. **β)** Στο διάγραμμα παριστάνεται γραφικά η μεταβολή της πίεσης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, για δύο διαφορετικές τιμές του όγκου V_1 και V_2 με $V_1 < V_2$.

Η μεταβολή στην οποία ο όγκος παραμένει σταθερός ονομάζεται **ισόχωρη**.

Στο σχήμα 3.2.β οι διακεκομμένες γραμμές υποδηλώνουν ότι η ευθεία της γραφικής παράστασης προεκτείνεται περνάει από την αρχή των αξόνων. Το διακεκομμένο τμήμα της ευθείας αντιστοιχεί σε θερμοκρασίες στις οποίες τα αέρια δεν υπακούουν στο νόμο.

Τη θερμοκρασία τη μετράμε σε βαθμούς Κέλβιν (K). Η θερμοκρασία αυτή ονομάζεται **απόλυτη θερμοκρασία**. Η θερμοκρασία στην κλίμακα Kelvin προκύπτει αν στη θερμοκρασία θ , μετρημένη στην κλίμακα Κελσίου, προσθέσουμε το 273.

$$T = 273 + \theta.$$

Το μηδέν της κλίμακας Kelvin αντιστοιχεί στους -273°C και είναι η θερμοκρασία κάτω από την οποία είναι αδύνατο να φτάσουμε. Τη θερμοκρασία αυτή τη λέμε και «**απόλυτο μηδέν**».

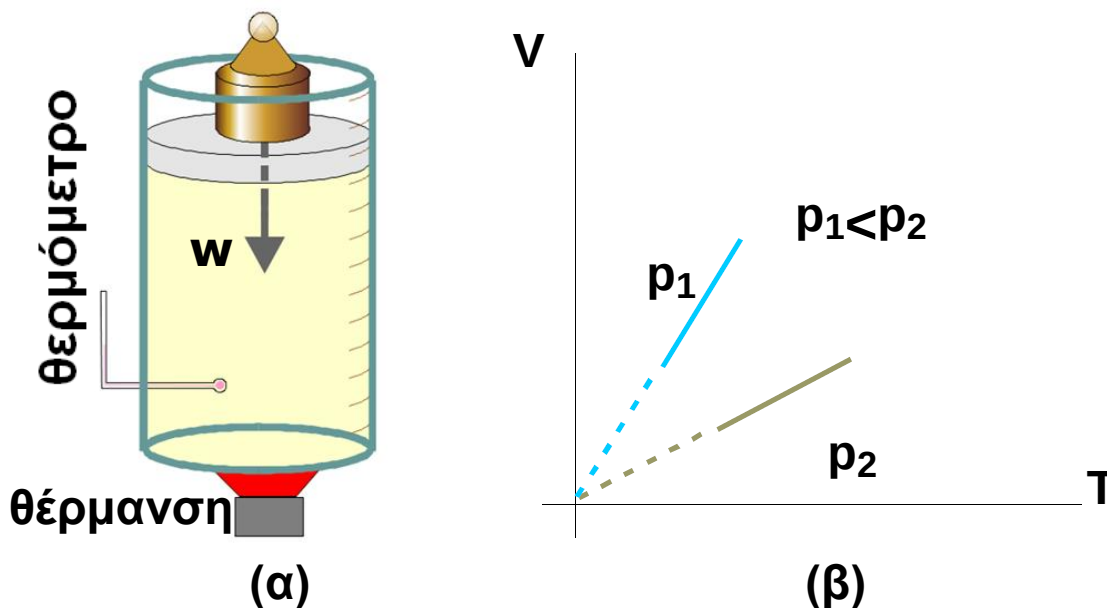
Ο νόμος του Gay – Lussac

(Γκέι-Λουσάκ, 1778-1850)

Ο όγκος ορισμένης ποσότητας αερίου, όταν η πίεσή του διατηρείται σταθερή, είναι ανάλογος με την από-λυτη θερμοκρασία του.

Η μαθηματική διατύπωση του νόμου είναι :

$$\frac{V}{T} = \text{σταθ.} \quad \text{για} \quad p = \text{σταθ.}$$



Σχ 3.3 α) Καθώς το αέριο θερμαίνεται ο όγκος του αυξάνεται. Η πίεση του αερίου διατηρείται σταθερή με ένα βάρος τοποθετημένο πάνω στο έμβολο. β) Στο διάγραμμα παριστάνεται γραφικά η μεταβολή του όγκου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, για δυο τιμές της πίεσης p_1 και p_2 με $p_1 < p_2$.

Η μεταβολή στην οποία η πίεση παραμένει σταθερή ονομάζεται **ισοβαρής**.

Ιδανικά αέρια

Οι τρεις προηγούμενοι νόμοι ισχύουν για τα διάφορα αέρια με μικρές ή μεγάλες αποκλίσεις. Συγκεκριμένα ισχύουν με μεγαλύτερη ακρίβεια για ένα μονοατομικό

παρά για ένα πολυατομικό αέριο που βρίσκεται στις ίδιες συνθήκες. Επίσης ισχύουν με μεγαλύτερη ακρίβεια για τα θερμά και αραιά αέρια από ό,τι για τα πυκνά και ψυχρά.

Ας υποθέσουμε τώρα ότι κάποιο αέριο υπακούει με ακρίβεια στους νόμους αυτούς ανεξάρτητα από το αν είναι θερμό ή ψυχρό, πυκνό ή αραιό. Ένα τέτοιο αέριο ακριβώς επειδή στην πραγματικότητα δεν υπάρχει θα ονομάζεται ιδανικό αέριο.

Μακροσκοπικά ιδανικό αέριο, είναι αυτό που υπακούει στους τρεις νόμους των αερίων σε οποιεσδήποτε συνθήκες κι αν βρίσκεται.

Σημείωση : Οι γραφικές παραστάσεις p - T (σχ. 3.2β) και V - T (σχ. 3.3β) αν αναφέρονταν σε ιδανικό αέριο θα ήταν συνεχείς γραμμές, για όλες τις θερμοκρασίες.

3-3 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΩΝ ΙΔΑΝΙΚΩΝ ΑΕΡΙΩΝ

Από το συνδυασμό των νόμων των αερίων προκύπτει η εξίσωση:

$$pV=nRT \quad (3.1)$$

Η (3.1) ονομάζεται καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων.

Η R ονομάζεται σταθερά των ιδανικών αερίων και η τιμή της εξαρτάται από τις μονάδες των p , V , T . Στο σύστημα SI, όπου μονάδα πίεσης είναι το N/m^2 και μονάδα όγκου είναι το m^3 , η τιμή της R είναι:

$$R=8,314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$$

Συνήθως η πίεση μετριέται σε ατμόσφαιρες (atm), ο όγκος σε λίτρα (L) και η τιμή της R είναι :

$$R=0,082 \text{ L}\cdot\text{atm/mol}\cdot\text{K}$$

Ο αριθμός των mol του αερίου βρίσκεται από το πηλίκο της ολικής μάζας $m_{ολ}$ του αερίου προς τη γραμμομοριακή του μάζα M .

$$n = \frac{m_{ολ}}{M} \quad (3.2)$$

Η σχέση (3.1) μπορεί με βάση την (3.2) να πάρει τη μορφή

$$p V = \frac{m_{ολ}}{M} R T \quad (3.3)$$

Το πηλίκο της συνολικής μάζας του αερίου προς τον όγκο του δίνει την πυκνότητά του :

$$\rho = \frac{m_{ολ}}{V}$$

Έτσι, η σχέση (3.1) μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$p = \frac{\rho}{M} R T$$

Η καταστατική εξίσωση μπορεί να μας δώσει και έναν απλούστερο μακροσκοπικό ορισμό του ιδανικού αερίου:

Ιδανικό αέριο είναι το αέριο για το οποίο ισχύει η καταστατική εξίσωση ακριβώς, σε όλες τις πιέσεις και θερμοκρασίες.

Στη συνέχεια, όπου αναφερόμαστε σε αέρια θα θεωρούμε ότι οι συνθήκες είναι τέτοιες ώστε η καταστατική εξίσωση να ισχύει χωρίς αποκλίσεις.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3-1

Στην αρχή ενός ταξιδιού η θερμοκρασία των ελαστικών ενός αυτοκινήτου είναι 7°C . Κατά τη διάρκεια του ταξιδιού τα ελαστικά θερμαίνονται στους 27°C . Αν στην αρχή του ταξιδιού ο αέρας στο εσωτερικό των ελαστικών βρισκόταν σε πίεση 3atm , πόση θα έχει γίνει η πίεση στο τέλος του ταξιδιού;

Υποθέτουμε ότι ο όγκος των ελαστικών παραμένει αμετάβλητος.

Απάντηση :

Αφού ο όγκος των ελαστικών παραμένει σταθερός, η μεταβολή είναι ισόχωρη και ισχύει $p/T = \text{σταθ}$

Αν p_1 , T_1 είναι η αρχική πίεση και θερμοκρασία και p_2 , T_2 η τελική πίεση και θερμοκρασία των ελαστικών, έχουμε

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad \text{επομένως} \quad p_2 = \frac{T_2}{T_1} p_1 = \frac{300\text{K}}{280\text{K}} 3\text{atm} = 3,2\text{atm}$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3-2

Να βρεθεί η πυκνότητα του αέρα μια καλοκαιρινή μέρα που η θερμοκρασία είναι 27°C . Υποθέτουμε ότι η ατμοσφαιρική πίεση είναι 1atm ($1\text{atm} = 1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$) και ότι ο αέρας συμπεριφέρεται σαν ιδανικό αέριο με γραμμομοριακή μάζα $29 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$.

Απάντηση :

Η καταστατική εξίσωση γράφεται με τη μορφή :

$$p = \frac{\rho}{M} RT \quad \text{από την οποία προκύπτει} \quad \rho = \frac{pM}{RT}$$

Αντικαθιστώντας στο SI έχουμε

$$\rho = \frac{1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \times 29 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}}{8,314 \text{ J/(mol K)} \times 300 \text{ K}} = 1,18 \text{ kg/m}^3$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3-3

$0,2 \text{ mol H}_2$ βρίσκονται σε δοχείο με κινητό έμβολο σε θερμοκρασία $T_1 = 300 \text{ K}$ και πίεση 2 atm (κατάσταση Α). Διατηρώντας σταθερή την πίεσή του θερμαίνουμε το αέριο μέχρις ότου η θερμοκρασία του γίνει $T_2 = 400 \text{ K}$ (κατάσταση Β). Στη συνέχεια το αέριο εκτονώνεται

ισόθερμα μέχρις ότου η πίεσή του γίνει ίση με 1,5 atm (κατάσταση Γ) και μετά ψύχεται με σταθερό όγκο μέχρι η θερμοκρασία του να γίνει $T_1=300\text{K}$ (κατάσταση Δ). Τέλος, το αέριο συμπιέζεται ισόθερμα μέχρι να φτάσει στην αρχική του κατάσταση.

Να βρείτε τις τιμές του όγκου της πίεσης, και της θερμοκρασίας που αντιστοιχούν στις καταστάσεις Α, Β, Γ και Δ και να αποδώσετε την παραπάνω διαδικασία σε διαγράμματα με άξονες P-V, P-T, και V-T.

Δίνεται η τιμή της σταθεράς $R=0,082 \text{ L} \cdot \text{atm/mol} \cdot \text{K}$

Απάντηση :

1.

A. Στην κατάσταση Α, το αέριο έχει πίεση $p_A=2 \text{ atm}$ και $T_A=300 \text{ K}$. Τον όγκο του αερίου μπορούμε να τον υπολογίσουμε από την καταστατική εξίσωση.

$$p_A V_A = nRT_A \quad \text{ή}$$

$$V_A = \frac{nRT_A}{p_A} = \frac{0,2 \text{ mol} \cdot 0,082 \text{ L} \cdot \text{atm}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \cdot 300 \text{ K}}{2 \text{ atm}}$$

από όπου προκύπτει $V_A=2,46 \text{ L}.$

B. Στην κατάσταση Β, το αέριο έχει πίεση $p_B=p_A=2 \text{ atm}$ και θερμοκρασία $T_B=400 \text{ K}$. Ο όγκος του υπολογίζεται από τη σχέση

$$\frac{V_A}{T_A} = \frac{V_B}{T_B} \quad \text{ή} \quad V_B = \frac{T_B}{T_A} V_A = \frac{400 \text{ K}}{300 \text{ K}} 2,46 \text{ L},$$

από όπου προκύπτει $V_B=3,28 \text{ L}.$

Γ. Στην κατάσταση Γ το αέριο έχει θερμοκρασία $T_{\Gamma} = 400 \text{ K}$ και πίεση $p_{\Gamma} = 1,5 \text{ atm}$. Ο όγκος του υπολογίζεται από τη σχέση

$$p_B V_B = p_{\Gamma} V_{\Gamma} \quad \text{ή} \quad V_{\Gamma} = \frac{p_B}{p_{\Gamma}} V_B = \frac{2 \text{ atm}}{1,5 \text{ atm}} 3,28 \text{ L},$$

από την οποία προκύπτει $V_{\Gamma} = 4,37 \text{ L}$.

Δ. Στην κατάσταση Δ το αέριο έχει θερμοκρασία $T_{\Delta} = 300 \text{ K}$ και όγκο $V_{\Delta} = V_{\Gamma} = 4,37 \text{ L}$. Η πίεσή του υπολογίζεται από τη σχέση

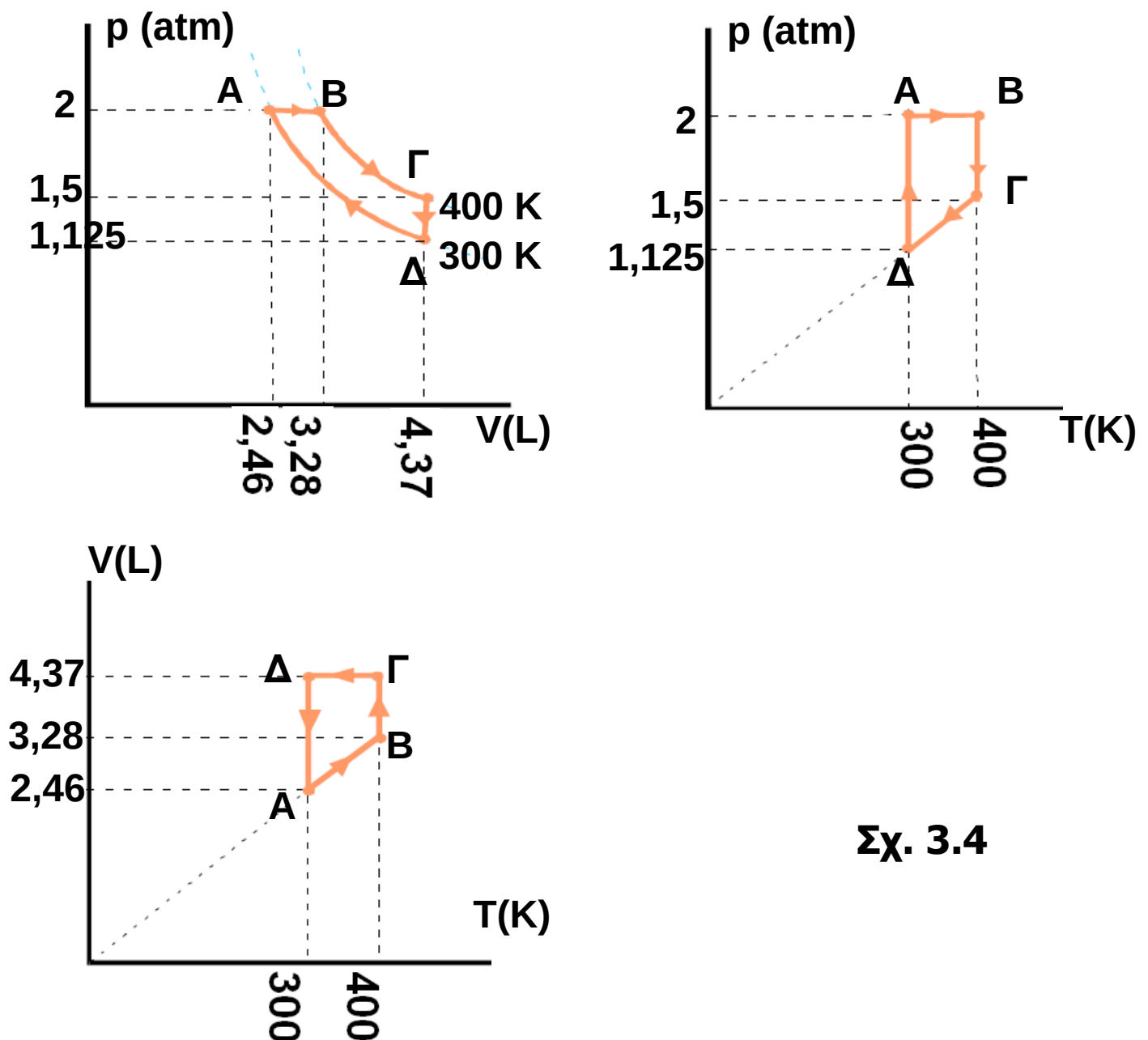
$$\frac{p_{\Delta}}{T_{\Delta}} = \frac{p_{\Gamma}}{T_{\Gamma}} \quad \text{ή} \quad p_{\Delta} = \frac{T_{\Delta}}{T_{\Gamma}} p_{\Gamma} = \frac{300 \text{ K}}{400 \text{ K}} 1,5 \text{ atm}$$

από την οποία προκύπτει $p_{\Delta} = 1,125 \text{ atm}$.

Οι τιμές που βρήκαμε φαίνονται συγκεντρωτικά στον πίνακα

	p (atm)	V (L)	T (K)
A	2	2,46	300
B	2	3,28	400
Γ	1,5	4,37	400
Δ	1,125	4,37	300

2. Με βάση τις τιμές του πίνακα μπορούμε να κατασκευάσουμε τα διαγράμματα :



Σχ. 3.4

3-4 ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ

Η ακριβής μέτρηση της θερμοκρασίας ή της πίεσης ή, ακόμη πιο πέρα, η γνώση των σχέσεων αναλογίας μεταξύ πίεσης, όγκου, αριθμού mol και θερμοκρασίας δεν αρκούν για να ερμηνεύσουμε τη συμπεριφορά των αερίων.

Η μακροσκοπική συμπεριφορά των αερίων ερμηνεύτηκε ικανοποιητικά, μόλις στο τέλος του 19ου αιώνα, με την **κινητική θεωρία των αερίων**. Η επιτυχία της κινητικής θεωρίας έδωσε το έναυσμα και για την ανάπτυξη

ιδεών για τη δομή της ύλης γενικότερα. Επίσης, όπως συμβαίνει συχνά στην ιστορία της επιστήμης, η ανάγκη επίλυσης πολύπλοκων υπολογιστικών προβλημάτων που έθετε η νέα θεωρία οδήγησε στην ανάπτυξη ενός νέου κλάδου της Φυσικής, της Στατιστικής Φυσικής, που αποτέλεσε αργότερα πολύτιμο εργαλείο για τη θεμελίωση της σύγχρονης Φυσικής, με εφαρμογές που ξεπέρασαν κατά πολύ τον αρχικό λόγο ύπαρξής της.

Σημείο εκκίνησης της κινητικής θεωρίας είναι η υπόθεση ότι τα αέρια αποτελούνται από πολύ μεγάλο πλήθος απειροελάχιστων σφαιριδίων που κινούνται τυχαία (άτακτα) μέσα στο χώρο που καταλαμβάνει το αέριο. Τα σφαιρίδια αυτά δεν είναι τίποτε άλλο από αυτό που σήμερα αποτελεί για τον καθένα κοινό τόπο, τα μόρια του αερίου.

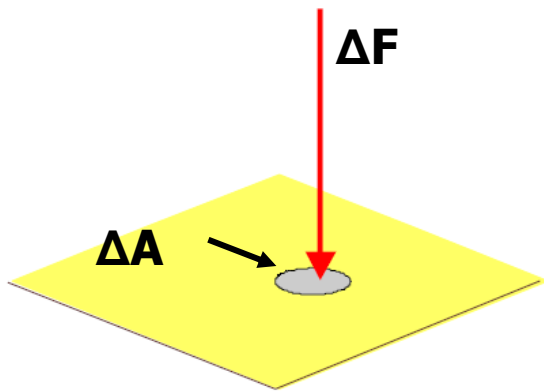
Πιο συγκεκριμένα, για τα ιδανικά αέρια, που προηγουμένως ορίστηκαν μακροσκοπικά ως τα αέρια για τα οποία ισχύει υπό οποιεσδήποτε συνθήκες η καταστατική εξίσωση, η κινητική θεωρία στηρίχτηκε στις εξής παραδοχές :

- 1. Τα μόρια του αερίου συμπεριφέρονται σαν μικροσκοπικές, απόλυτα ελαστικές, σφαίρες. Έτσι ο συνολικός όγκος των μορίων του αερίου μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος σε σχέση με τον όγκο του δοχείου στο οποίο βρίσκεται.**
- 2. Στα μόρια δεν ασκούνται δυνάμεις παρά μόνο τη στιγμή της κρούσης με άλλα μόρια ή με τα τοιχώματα του δοχείου. Έτσι, η κίνησή τους, στο μεσοδιάστημα μεταξύ δύο κρούσεων, είναι ευθύγραμμη ομαλή.**
- 3. Οι κρούσεις των μορίων με τα τοιχώματα είναι ελαστικές. Έτσι η κινητική ενέργεια του μορίου δεν μεταβάλλεται μετά την κρούση του με το τοίχωμα**

3-5 ΤΑ ΠΡΩΤΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σχέση πίεσης (p) και θερμοκρασίας (T) με τις ταχύτητες των μορίων.

Βασισμένοι στις παραπάνω παραδοχές καταφέραμε να βρούμε σχέσεις που συνδέουν τα μακροσκοπικά μεγέθη, όπως η πίεση και η θερμοκρασία, που μέχρι τώρα μπορούσαμε να τα προσδιορίσουμε μόνο πειραματικά, με τις μέσες τιμές των ταχυτήτων των μορίων του αερίου.

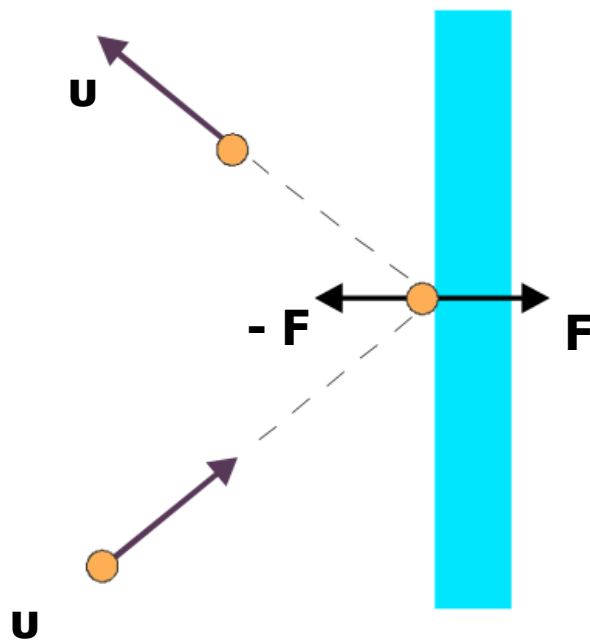


Σχ. 3.5 Το ΔA είναι ένα στοιχειώδες τμήμα της επιφάνειας και ΔF η δύναμη που ασκείται σε αυτό.

Η πίεση είναι το μονόμετρο μέγεθος που ορίζεται ως το πηλίκο του μετρου της δύναμης που ασκείται κάθετα σε κάποια επιφάνεια προς το εμβαδόν της επιφάνειας (σχ. 3.5).

$$p = \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

Στην περίπτωση ενός αερίου που είναι κλεισμένο σ' ένα δοχείο η πίεση που ασκείται στα τοιχώματα του δοχείου οφείλεται στις δυνάμεις που ασκούν τα μόρια του αερίου στα τοιχώματα κατά τις κρούσεις τους με αυτά (σχ. 3.6).



Σχ.3.6 Η κρούση του μορίου με το τοίχωμα θεωρείται ελαστική. Το μέτρο της ταχύτητας του μορίου είναι το ίδιο πριν και μετά την κρούση.

Η πρώτη σχέση που προκύπτει από την εφαρμογή των νόμων της μηχανικής και των παραδοχών της κινητικής θεωρίας, είναι αυτή που συνδέει την πίεση (p) του αερίου με τις ταχύτητες των μορίων του αερίου.

Βρέθηκε συγκεκριμένα ότι

$$p = \frac{1}{3} \frac{N m \overline{u^2}}{V} \quad (3.4)$$

όπου	N	ο αριθμός των μορίων του αερίου,
	m	η μάζα κάθε μορίου,
	V	ο όγκος του δοχείου και
	$\overline{u^2}$	η μέση τιμή των τετραγώνων των ταχυτήτων των μορίων του αερίου.

Η απόδειξη της σχέσης (3.4) γίνεται στο τέλος της παραγράφου.

Μια άλλη, πιο κομψή, μορφή της σχέσης (3.4) προκύπτει αν λάβουμε υπόψη ότι το γινόμενο Nm είναι η ολική μάζα του αερίου, και ότι το πηλίκο της ολικής μάζας προς τον όγκο V που καταλαμβάνει το αέριο είναι η

πυκνότητα ρ του αερίου, οπότε : $p = \frac{1}{3} \rho \overline{u^2}$

Πολλαπλασιάζοντας και διαιρώντας το δεύτερο μέλος της (3.4) με τον αριθμό 2 προκύπτει η παρακάτω μορφή που συνδέει την πίεση με τη μέση κινητική ενέργεια των μορίων.

$$p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \left(\frac{1}{2} m \overline{u^2} \right) \quad (3.5)$$

Από την (3.5) προκύπτει

$$pV = \frac{2}{3} N \left(\frac{1}{2} m \overline{u^2} \right) \quad (3.6)$$

Όμως από την καταστατική εξίσωση γνωρίζουμε ότι

$$pV = nRT = \frac{N}{N_A} RT$$

όπου N_A ο αριθμός των μορίων ανά mol (σταθερά Avogadro).

Το πηλίκο $\frac{R}{N_A}$ εμφανίζεται συχνά στην κινητική θεωρία.

Είναι το πηλίκο δύο σταθερών, ονομάζεται **σταθερά του Boltzmann** (Μπόλτζμαν) και συμβολίζεται με το k .

$$k = \frac{R}{N_A} = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J}/(\text{μόριο} \cdot \text{K})$$

Μπορούμε λοιπόν να γράψουμε την καταστατική και ως εξής :

$$pV = NkT \quad (3.7)$$

Εξισώνοντας τα δεύτερα μέλη των σχέσεων (3.6) και (3.7) και λύνοντας ως προς T βρίσκουμε

$$T = \frac{2}{3} \frac{1}{k} \left(\frac{1}{2} m \overline{u^2} \right)$$

Η σχέση αυτή είναι πολύ σημαντική γιατί συνδέει τη θερμοκρασία με τη μέση μεταφορική κινητική ενέργεια των μορίων του αερίου.

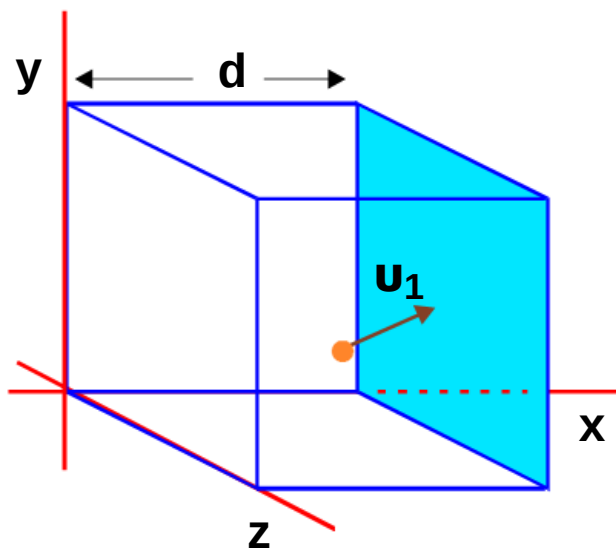
Από τη σχέση αυτή, για τη μέση κινητική ενέργεια των μορίων βρίσκουμε

$$\frac{1}{2} m \overline{u^2} = \frac{3}{2} kT \quad (3.8)$$

Η τετραγωνική ρίζα της $\overline{u^2}$ ονομάζεται **ενεργός ταχύτητα** και συμβολίζεται $u_{εV}$. Από τη σχέση (3.8) προκύπτει

$$u_{εV} = \sqrt{\overline{u^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (3.9)$$

Απόδειξη της σχέσης $p = \frac{1}{3} \frac{N m \overline{u^2}}{V}$



Σχ. 3.7 Ένα μόριο του αερίου που κινείται με ταχύτητα u_1 μέσα σε κυβικό δοχείο ακμής d .

Θεωρούμε ένα κυβικό δοχείο ακμής d . (σχ. 3.7). Το δοχείο θα έχει όγκο $V=d^3$ και εμβαδόν έδρας $A=d^2$. Υποθέτουμε ότι στο δοχείο περιέχεται πολύ μεγάλος αριθμός N πανομοιότυπων μορίων αερίου, μάζας m το καθένα, που πληρούν τις προϋποθέσεις της προηγούμενης παραγράφου. Τα τοιχώματα του δοχείου είναι τελείως άκαμπτα, έχουν πολύ μεγάλη μάζα και δε μετακινούνται.

Κατά τη διάρκεια των κρούσεων των μορίων στα τοιχώματα, τα μόρια ασκούν δυνάμεις σ' αυτά. Σ' αυτές τις δυνάμεις οφείλεται η πίεση που ασκεί το αέριο. Οι δυνάμεις αυτές είναι αντίθετες με τις δυνάμεις που ασκούνται από το τοίχωμα στα μόρια κατά την κρούση (αρχή δράσης- αντίδρασης) και προκαλούν τη μεταβολή της ορμής των μορίων.

Από το δεύτερο νόμο του Newton γνωρίζουμε ότι

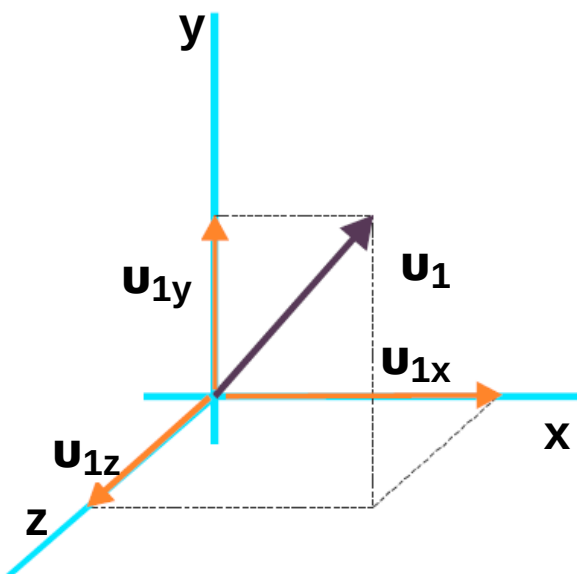
$$F = \frac{\Delta P}{\Delta t}$$

άρα, αν καταφέρουμε να υπολογίσουμε τη

συνολική μεταβολή της ορμής που υφίστανται τα μόρια στη μονά-δα του χρόνου (δηλ. το ρυθμό μεταβολής της ορμής τους) λόγω των κρούσεών τους πάνω σε μία από τις έδρες του δοχείου θα βρούμε και το μέτρο της δύναμης που ασκείται από τα μόρια σ' αυτή την έδρα.

Μετά, για να βρούμε την πίεση p , αρκεί να διαιρέσουμε τη δύναμη με την επιφάνεια $\left(p = \frac{F}{A} \right)$.

(Προσοχή : χρησιμοποιούμε κεφαλαίο P για την ορμή και μικρό p για την πίεση.)



Σχ. 3.8 Η ταχύτητα αναλύεται σε τρεις συνιστώσες σε τρισσορθogώνιο σύστημα συντεταγμένων.

Έστω ένα μόριο που κινείται με ταχύτητα u_1 . Αναλύουμε την ταχύτητά του σε τρεις συνιστώσες (u_{1x} , u_{1y} , u_{1z})

(σχ. 3.8). Εξετάζουμε τις κρούσεις στο τοίχωμα του δοχείου που είναι κάθετο στη u_{1x} .

Εφόσον οι κρούσεις είναι απολύτως ελαστικές το μόριο ανακλάται με ταχύτητα ίδιου μέτρου. Η u_{1y} και η u_{1z} δε μεταβάλλονται ενώ η u_{1x} αλλάζει φορά.

Η μεταβολή της ορμής που υφίσταται το μόριο κατά την κρούση θα είναι

$$\Delta p_{1x} = -mu_{1x} - mu_{1x} = -2mu_{1x}$$

Ο χρόνος που μεσολαβεί ανάμεσα σε δύο διαδοχικές κρούσεις του ίδιου σωματιδίου στην ίδια έδρα θα είναι

$$\Delta t = \frac{2d}{u_{1x}} \quad \text{άρα ο αριθμός κρούσεων στη μονάδα του}$$

χρόνου για αυτό το μόριο στην ίδια έδρα θα είναι $\frac{u_{1x}}{2d}$

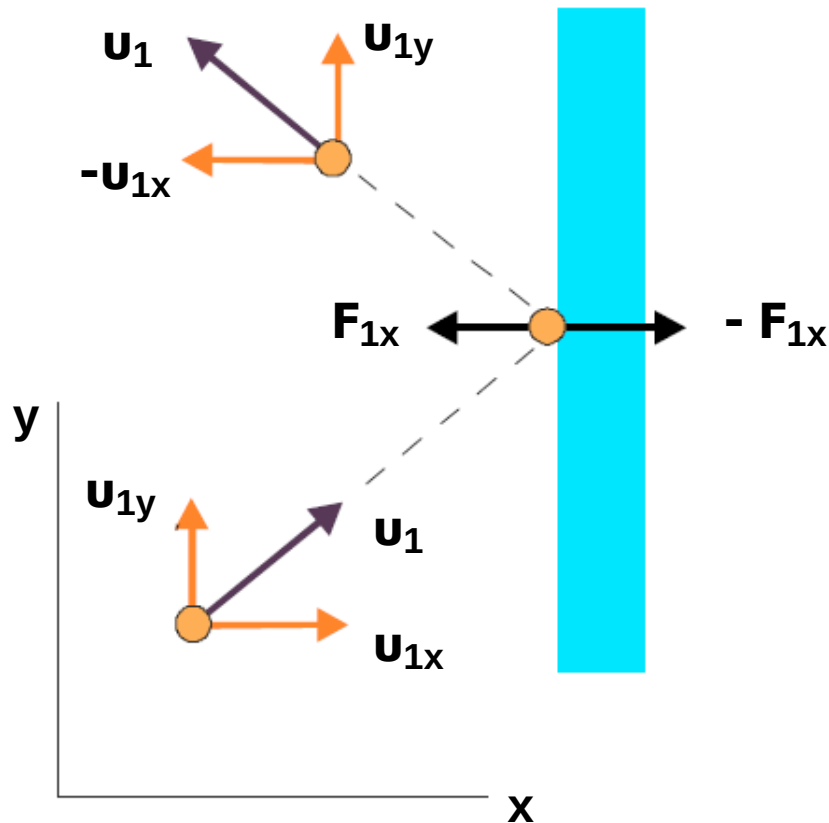
και ο ρυθμός μεταβολής της ορμής του (η μεταβολή της ορμής στη μονάδα του χρόνου) θα είναι

$$\frac{\Delta P_{1x}}{\Delta t} = -2m \frac{u_{1x}}{2d} = -\frac{mu_{1x}^2}{d}$$

Η δύναμη που δέχεται το μόριο από το τοίχωμα θα είναι

$$F_{1x} = \frac{\Delta P_{1x}}{\Delta t} = -\frac{mu_{1x}^2}{d} \quad \text{και αντίστοιχα αυτή που δέχεται το}$$

$$\text{τοίχωμα από το μόριο θα είναι} \quad -F_{1x} = -\frac{mu_{1x}^2}{d}$$



Σχ. 3.9 Η κίνηση του μορίου στο επίπεδο xy.

Η δύναμη (ΣF_x) που ασκείται πάνω στο τοίχωμα που μελετάμε είναι το άθροισμα όλων των αντίστοιχων όρων που αφορούν κάθε μόριο χωριστά.

Η πίεση (p) που δέχεται η εν λόγω έδρα από το αέριο θα είναι $p = \frac{\Sigma F_x}{A}$ όπου $A = d^2$.

$$\text{Άρα } p = \frac{\left(\frac{mu_{1x}^2}{d} + \frac{mu_{2x}^2}{d} + \dots + \frac{mu_{Nx}^2}{d} \right)}{d^2} =$$

$$= \frac{m(u_{1x}^2 + u_{2x}^2 + \dots + u_{Nx}^2)}{d^3}$$

Πολλαπλασιάζουμε και διαιρούμε το κλάσμα με N (το πλήθος των μορίων) οπότε

$$p = \frac{Nm (u_{1x}^2 + u_{2x}^2 + \dots + u_{Nx}^2)}{Nd^3}$$

Ο όρος $\frac{u_{1x}^2 + u_{2x}^2 + \dots + u_{Nx}^2}{N}$ είναι η μέση τιμή των τετραγώνων των u_x ταχυτήτων και θα τον συμβολίζουμε $\overline{u_x^2}$.

Τελικά

$$p = \frac{Nm \overline{u_x^2}}{d^3} \quad (3.10)$$

Τα μόρια κινούνται άτακτα, δεν έχουν δηλαδή καμιά προτίμηση ως προς την κατεύθυνση κίνησής τους, επομένως

$$\overline{u_x^2} = \overline{u_y^2} = \overline{u_z^2}$$

Γνωρίζουμε ότι γενικά $u^2 = u_x^2 + u_y^2 + u_z^2$

Εύκολα αποδεικνύεται ότι $\overline{u^2} = \overline{u_x^2} + \overline{u_y^2} + \overline{u_z^2}$

επειδή $\overline{u_x^2} = \overline{u_y^2} = \overline{u_z^2}$

καταλήγουμε στη σχέση $\overline{u^2} = 3\overline{u_x^2}$

άρα $\overline{u_x^2} = \frac{\overline{u^2}}{3}$

Αντικαθιστώντας το ίσον της $\overline{u_x^2}$ στη σχέση (3.10) και λαμβάνοντας υπόψη ότι $d^3 = V$ προκύπτει

$$p = \frac{1}{3} \frac{N m \overline{u^2}}{V}$$



Εικ.3.3 Οι δυνάμεις που ασκούνται κατά τις κρούσεις των μορίων του αερίου, που περιέχουν τα μπαλόνια, με τα τοιχώματα τεντώνουν το ελαστικό περίβλημα των μπαλονιών.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3-4

Να βρεθεί η ενεργός ταχύτητα των μορίων του υδρογόνου σε θερμοκρασία 27°C . Δίνεται ότι η γραμμομοριακή μάζα του υδρογόνου είναι $2 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$.

Απάντηση :

Γνωρίζουμε ότι $u_{\text{εv}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$

Πολλαπλασιάζοντας αριθμητή και παρονομαστή του υπόρριζου με τον αριθμό Avogadro (N_A) προκύπτει

$$u_{\text{εv}} = \sqrt{\frac{3kN_A T}{N_A m}} \quad (3.11)$$

Όμως $k = \frac{R}{N_A}$ επομένως $kN_A = R$ και $N_A m = M$ (M : η γραμμομοριακή μάζα)

Άρα η σχέση (1.11) γίνεται

$$u_{\text{ev}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

Αντικαθιστώντας στο SI

$$u_{\text{ev}} = \sqrt{\frac{3 \cdot (8,314 \text{ J/mol K}) \cdot (273+27)\text{K}}{2 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}}} = 1,93 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

Η ταχύτητα αυτή είναι πολύ μεγάλη, είναι περίπου 6900 km/h.

3-6 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΟΡΙΑΚΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

Το πείραμα του Zartman (Ζάρτμαν)

Ο αριθμός των μορίων ενός αερίου, όσο μικρή και αν είναι η ποσότητά του, είναι τεράστιος. Το κάθε μόριο συγκρούεται και αλλάζει ταχύτητα περίπου ένα δισεκατομμύριο φορές το δευτερόλεπτο. Έτσι είναι φανερό ότι η ερώτηση πόσα μόρια έχουν κάποια στιγμή μια συγκεκριμένη ταχύτητα u δεν έχει νόημα. Μπορούμε όμως να βρούμε τον αριθμό των μορίων dN που έχουν ταχύτητες από u μέχρι $u+du$.

Το 1920 έγινε το πρώτο πείραμα για τη μέτρηση των μοριακών ταχυτήτων. Το πείραμα που θα περιγράψουμε είναι το πείραμα με το οποίο ο Zartman προσδιόρισε πειραματικά τις ταχύτητες των μορίων ενός αερίου.

Μέσα σε ένα φούρνο εξαερώνεται μια ουσία. Τα μόρια του ατμού διαφεύγουν από ένα άνοιγμα του φούρνου προς ένα θάλαμο κενού (σχ.3.10). Στο θάλαμο περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω ένας κύλινδρος που φέρει, παράλληλα στον άξονά του, λεπτή σχισμή και στο εσωτερικό της κυρτής του επιφάνειας φέρει ειδικό ευαίσθητο φιλμ. Τα μόρια του ατμού που εισέρχονται από τη σχισμή μέσα στον κύλινδρο συνε-

χίζουν να κινούνται ευθύγραμμα μέχρι να συναντήσουν το φιλμ, στο οποίο προσκολλώνται και αφήνουν τα ίχνη τους σε απόσταση d από το σημείο του φιλμ που βρίσκεται ακριβώς απέναντι από την σχισμή.

Αν u η γραμμική ταχύτητα του φιλμ και t ο χρόνος που χρειάζεται το μόριο για να διατρέξει τη διάμετρο του κυλίνδρου

η απόσταση d ισούται με $d=ut$

όμως $t=2r/u$

όπου u η ταχύτητα των μορίων

και $u=\omega r$

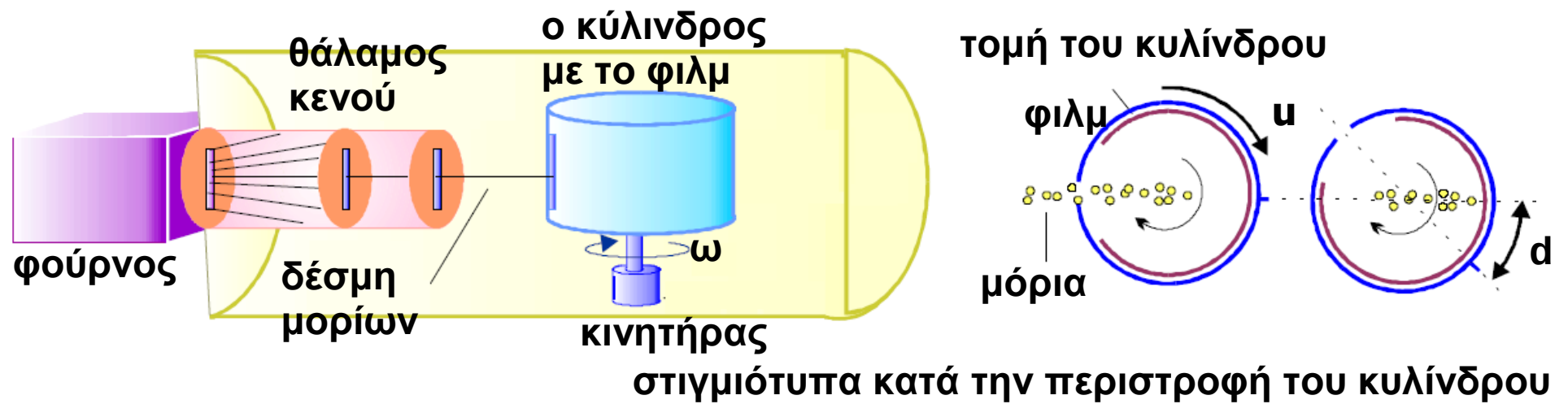
όπου r η ακτίνα του κυλίνδρου.

Επομένως,
$$d=ut=\omega r \frac{2r}{u} = \frac{2\omega r^2}{u}$$

Η ταχύτητα των μορίων υπολογίζεται από τη σχέση $u=2\omega r^2/d$. Δηλαδή, η μέτρηση της ταχύτητας των μορίων βασίζεται στη μέτρηση της απόστασης d .

Στην πράξη, αυτό που μπορούμε να υπολογίσουμε είναι πόσα μόρια πέφτουν σε κάθε σημείο του φιλμ και επομένως να υπολογίσουμε την κατανομή των μορίων στις διάφορες ταχύτητες.

Σήμερα είναι δυνατή η μέτρηση των μοριακών ταχυτήτων των αερίων με μεγάλη ακρίβεια.



Σχ.3.10 Το μοντέλο της πειραματικής διάταξης του Zartman.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3-5

Από ένα πείραμα ανάλογο με το πείραμα του Zartman, μετρήθηκαν οι ταχύτητες των μορίων και προέκυψε ο παρακάτω πίνακας (ο πίνακας έχει χωριστεί σε 3 με-
ρη.)

u (m/s)	100	200	300	400
Δu (m/s)	0,4	0,25	0,2	0,1
ΔN (μόρια)	200	240	400	220
$\Delta N/\Delta u$ (μόρια/m/s)	500	960	2000	2200

u (m/s)	500	600	700	800
Δu (m/s)	0,2	0,2	0,4	0,5
ΔN (μόρια)	360	240	200	200
$\Delta N/\Delta u$ (μόρια/m/s)	1800	1200	500	400

u (m/s)	900	1000	1100
Δu (m/s)	0,8	1,2	5
ΔN (μόρια)	160	120	250
$\Delta N/\Delta u$ (μόρια/m/s)	200	100	50

όπου

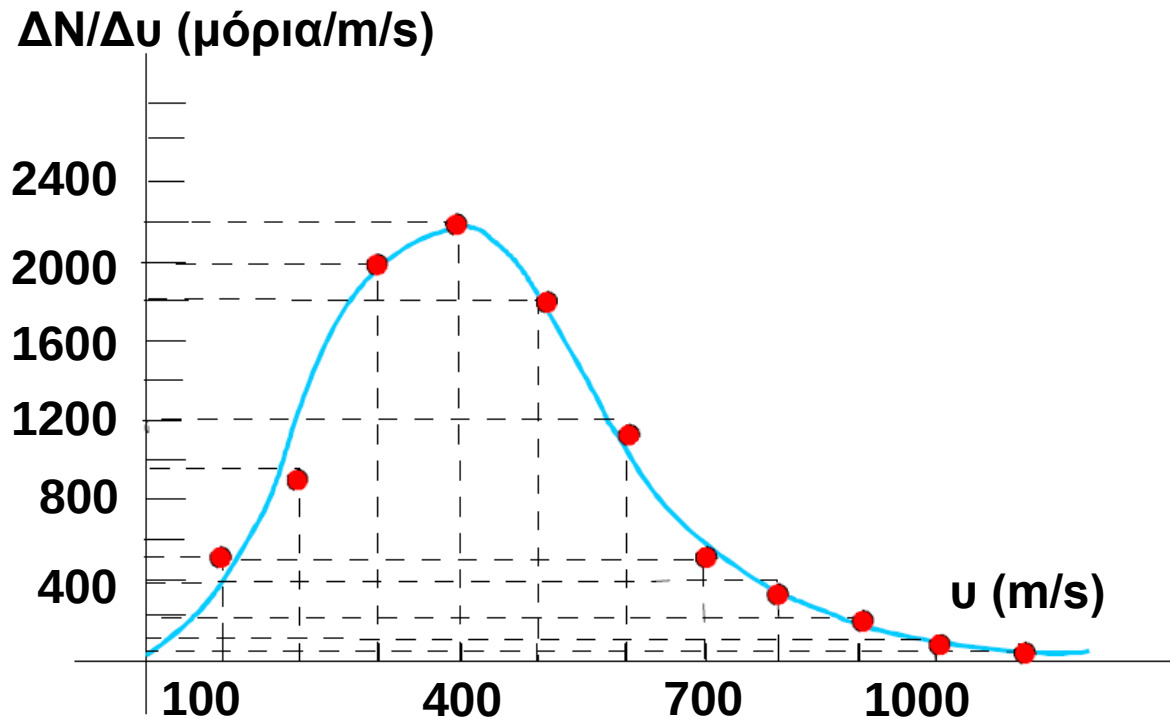
u : ταχύτητες των μορίων

Δu : περιοχές ταχυτήτων γύρω από κάθε ταχύτητα. Οι περιοχές ταχυτήτων δεν έχουν όλες το ίδιο εύρος ώστε να εξασφαλίζεται ότι σε κάθε περιοχή υπάρχει ένας ικανοποιητικός, μετρήσιμος αριθμός ΔN μορίων που κινούνται με ταχύτητες εντός της περιοχής.

ΔN : αριθμός μορίων που έχουν ταχύτητες μέσα στα όρια της κάθε περιοχής ταχυτήτων. Για παράδειγμα στην πρώτη στη λη 200 μόρια έχουν ταχύτητες από 99,8 m/s έως 100,2 m/s.

$\Delta N/\Delta u$: ο αριθμός των μορίων ανά μοναδιαία περιοχή ταχύτητας.

Με βάση τα στοιχεία αυτά το διάγραμμα $\Delta N/\Delta u = f(u)$ της κατανομής των ταχυτήτων των μορίων του αερίου είναι:



Κατανομή κατά Maxwell – Boltzmann (Μάξγουελ - Μπόλτςμαν)

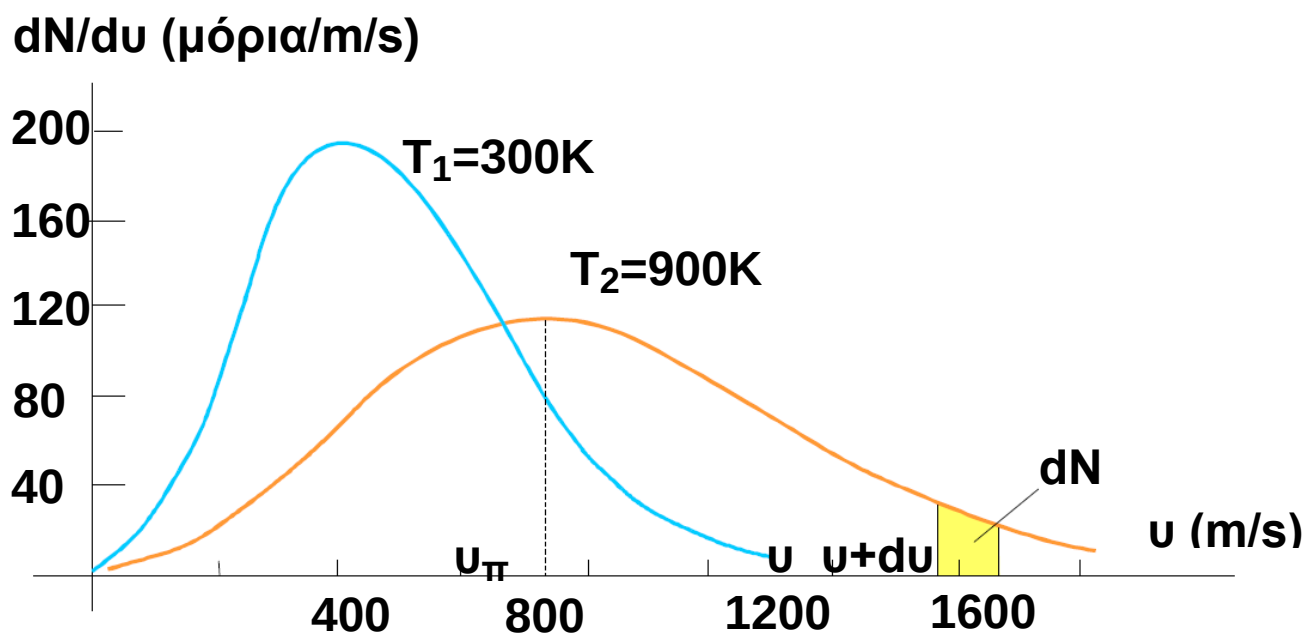


Εικ. 3.4 Ludwig Boltzmann (1844-1906) Αυστριακός θεωρητικός φυσικός. Η συνεισφορά του στην κινητική θεωρία και στη στατιστική μηχανική υπήρξε μεγάλη.

Οι Maxwell και Boltzmann γύρω στο 1860, πολύ πριν γίνει εφικτό να μετρηθούν πειραματικά οι ταχύτητες των

μορίων, υπολόγισαν θεωρητικά πώς κατανέμονται τα μόρια ενός αερίου στις διάφορες ταχύτητες.

Στο σχήμα 3.12 παριστάνεται γραφικά η συνάρτηση $dN/du=f(u)$ των Maxwell και Boltzmann για $N=10^5$ μόρια αζώτου στις θερμοκρασίες 300 K και 900 K.



Σχ. 3.12

Οι ταχύτητες καλύπτουν ευρεία περιοχή. Η συνάρτηση dN/du τείνει στο μηδέν όταν $u \rightarrow 0$ και όταν $u \rightarrow \infty$. Η ταχύτητα που αντιστοιχεί στο μέγιστο της καμπύλης είναι η **πιο πιθανή ταχύτητα** και συμβολίζεται με u_{π} .

Δύο άλλες ταχύτητες που παρουσιάζουν ενδιαφέρον είναι η μέση ταχύτητα $\bar{u}$ και η ενεργός ταχύτητα $u_{εν}$.

Η μέση ταχύτητα $\bar{u}$ είναι η μέση τιμή των ταχυτήτων των μορίων του αερίου. Δηλαδή αν οι ταχύτητες των μορίων είναι $u_1, u_2, \dots$ και ο αριθμός των μορίων N

$$\bar{u} = \frac{u_1 + u_2 + u_3 + \dots}{N}$$

Η ενεργός ταχύτητα είναι

$$u_{\text{εν}} = \sqrt{\frac{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots}{N}}$$

Συχνά, σε διάφορες κατανομές, η μέση τιμή ενός μεγέθους ταυτίζεται με την πιθανότερη τιμή του μεγέθους. Στην κατανομή Maxwell-Boltzmann η $\bar{u}$ είναι μεγαλύτερη της u_{π} γιατί προβλέπονται μόρια, έστω και λίγα, με πολύ μεγάλες ταχύτητες (δεν υπάρχει άνω όριο στις ταχύτητες των μορίων). Όσον αφορά τη $u_{\text{εν}}$ αποδεικνύεται μαθηματικά ότι η ενεργός τιμή είναι μεγαλύτερη από τη μέση τιμή (βλέπε ένθετο στη σελίδα 57/94). Έτσι με-ταξύ των τριών ταχυτήτων που προαναφέραμε ισχύει $u_{\pi} < \bar{u} < u_{\text{εν}}$.

Αν το τμήμα που έχει κίτρινο χρώμα μπορεί να θεωρηθεί παραλληλόγραμμο και μπορεί να θεωρηθεί αν το du είναι απειροστά μικρό τότε το εμβαδόν του είναι: $du \times dN/du = dN$ δηλαδή δίνει τον αριθμό dN των μορίων που έχουν ταχύτητες από u έως $u+du$. Το εμβαδόν που περικλείεται από την καμπύλη και τον άξονα των u δίνει το συνολικό αριθμό των μορίων του αερίου.

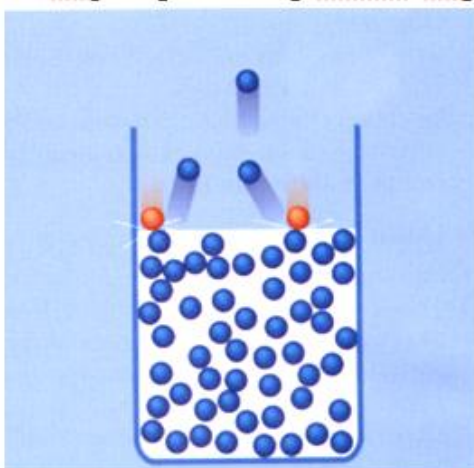
Βλέπουμε ότι όταν η θερμοκρασία του αερίου αυξάνεται η καμπύλη μετατοπίζεται προς τα δεξιά και η κορυφή της χαμηλώνει. Αυτό συμβαίνει γιατί όσο αυξάνεται η θερμοκρασία ο αριθμός των μορίων που έχουν ταχύτητα μεγαλύτερη από μία δεδομένη τιμή αυξάνεται, η μετατόπιση όμως της καμπύλης δεξιότερα διευρύνει την βάση της και, καθώς το εμβαδόν που περικλείει παραμένει αμετάβλητο (συνολικός αριθμός μορίων), η κορυφή της χαμηλώνει.

3-7 ΤΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΕΧΟΥΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Η κινητική θεωρία αναπτύχθηκε για να ερμηνεύσει τη συμπεριφορά των αερίων. Όμως κάποια από τα συμπεράσματά της, ποιοτικά τουλάχιστον, ισχύουν για όλες τις μορφές της ύλης. Το συμπέρασμα με την ευρύτερη εφαρμογή είναι η σχέση ανάμεσα στη μέση κινητική ενέργεια των μορίων και τη θερμοκρασία.

Σ' ένα στερεό τα μόρια ασκούν το ένα στο άλλο ισχυρές δυνάμεις, με αποτέλεσμα να παραμένουν σταθερά «δεμένα» σε κάποιες θέσεις. Η μόνη κίνηση που τους επιτρέπεται είναι μια ταλάντωση γύρω από τη συγκεκριμένη θέση τους. Αν αυξήσουμε τη θερμοκρασία του στερεού, οι ταλαντώσεις των μορίων του γίνονται πιο έντονες (με μεγαλύτερο πλάτος), πάντα όμως γύρω από την ίδια θέση. Βλέπουμε ότι και εδώ η κινητικότητα των μορίων αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας. Όταν η θερμοκρασία πάρει ορισμένη τιμή που τη λέμε θερμοκρασία ή σημείο τήξης του στερεού - τα μόριά του ταλαντώνονται με τόση ενέργεια ώστε να μπορούν να “ξεκολλήσουν” από τη θέση τους. Η οργανωμένη δομή του στερεού καταστρέφεται. Το στερεό τήκεται, περνάει δηλαδή στην υγρή φάση.

Η εξαερίωση των υγρών



Σχ. 3.13 Στην εξάτμιση μόρια εγκαταλείπουν την υγρή φάση μόνο από την επιφάνεια του υγρού.

Η δομή των υγρών είναι πολύ πιο κοντά στη δομή των αερίων απ' ό,τι στη δομή των στερεών. Εδώ τα μόρια δεν έχουν συγκεκριμένες θέσεις, οι δυνάμεις μεταξύ των μορίων όμως είναι τόσο ισχυρές ώστε να μη μπορούμε να τις αγνοήσουμε. Θα έλεγε κανείς ότι τα μόρια έχουν την ελευθερία να ταξιδεύουν, με διάφορες ταχύτητες, στο χώρο που καταλαμβάνει το υγρό. Η ελευθερία των μορίων δεν είναι απόλυτη όπως στα ιδανικά αέρια και η κίνησή τους δεν είναι ευθύγραμμη ομαλή. Παρόλα αυτά, οι ταχύτητες των μορίων στα υγρά ακολουθούν κατανομή που μοιάζει αρκετά με αυτή των Maxwell-Boltzmann για τα αέρια. Αυτό σημαίνει ότι μέσα στο υγρό πάντα υπάρχει ένας αριθμός μορίων που έχουν αρκετά μεγάλες ταχύτητες, που τους επιτρέπουν να “δραπτεύσουν” από τις διαμοριακές έλξεις και να εγκαταλείψουν το υγρό από την ελεύθερη επιφάνειά του. Πρόκειται για το φαινόμενο της **εξάτμισης**.

Δύο παρατηρήσεις από την καθημερινή ζωή επαληθεύουν την υπόθεσή μας.

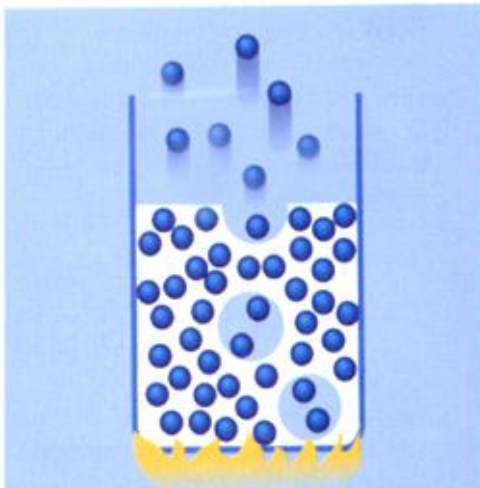
- α. Οποιοδήποτε υγρό εξατμίζεται εντονότερα όταν η θερμοκρασία του είναι μεγαλύτερη. (Τα ρούχα στεγνώνουν γρηγορότερα το καλοκαίρι).
- β. Όταν εξατμίζεται ένα υγρό η θερμοκρασία του πέφτει. (Όταν κάποιος έχει πυρετό τού βάζουμε κομπρέσες με νερό στο οποίο προσθέτουμε κάποιο υγρό που εξατμίζεται γρήγορα στη θερμοκρασία του δωματίου, (π.χ οινόπνευμα), μ' αποτέλεσμα το υγρό να διατηρείται δροσερό).

Είδαμε ότι όταν αυξάνει η θερμοκρασία η καμπύλη της κατανομής των ταχυτήτων των μορίων των αερίων μετατοπίζεται προς τα δεξιά. Αυτό σημαίνει ότι, κατά μέσο όρο, οι ταχύτητες των μορίων αυξάνονται. Κάτι

ανάλογο συμβαίνει και με τις ταχύτητες των μορίων του υγρού. Είναι λοιπόν αναμενόμενο, όταν θερμαίνεται το υγρό να αυξάνεται ο αριθμός των μορίων της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού που έχουν την απαραίτητη κινητική ενέργεια για να εγκαταλείψουν το υγρό.

Καθώς τα πιο γρήγορα μόριά του εγκαταλείπουν το υγρό, η μέση κινητική ενέργεια των μορίων που απομένουν μικραίνει. Σύμφωνα με τη σχέση $\frac{1}{2}m\overline{u^2} = \frac{3}{2}kT$ που

συνδέει τη μέση κινητική ενέργεια των μορίων των ιδανικών αερίων με τη θερμοκρασία και, απ' ό,τι φαίνεται, ισχύει ποιοτικά και για τα υγρά, είναι και θεωρητικά αναμενόμενο να ψύχεται το υγρό.



Σχ. 3.14 Στο βρασμό μόρια εγκαταλείπουν την υγρή φάση από το σύνολο του όγκου του υγρού

Εάν τώρα αυξήσουμε τη θερμοκρασία του υγρού, φτάνουμε σε μια θερμοκρασία, τη θερμοκρασία ή σημείο ζέσεως, στην οποία ένας πολύ μεγάλος αριθμός μορίων από όλο τον όγκο του και όχι μόνο από την ελεύθερη επιφάνειά του αποκτά την απαραίτητη κινητική ενέργεια για να εγκαταλείψει το υγρό. Έχουμε το φαινόμενο του βρασμού.

Η εξαέρμιση και ο βρασμός είναι δύο μορφές του φαινομένου της εξαερίωσης των υγρών.

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι οποιοδήποτε υγρό, με την πάροδο του χρόνου, θα πρέπει να εξατμι-

σθεί πλήρως. Ο χρόνος που θα χρειαστεί γι' αυτό εξαρτάται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, την ποσότητα του υγρού, το εμβαδόν της ελεύθερης επιφάνειάς του καθώς και το είδος του υγρού (πόσο ισχυρές είναι οι δυνάμεις μεταξύ των μορίων του). Υπάρχει όμως ένα φαινόμενο που κλονίζει λίγο τη βεβαιότητά μας. Γνωρίζουμε όλοι ότι εάν αποθηκεύσουμε ένα υγρό μέσα σ' ένα μπουκάλι που κλείνει καλά, όσα χρόνια κι αν περάσουν, ακόμη και αν η θερμοκρασία είναι ψηλή και το υγρό από αυτά που εξατμίζονται εύκολα, το υγρό μας δεν πρόκειται να εξατμισθεί πλήρως.

Σ' αυτό το αδιέξοδο φτάσαμε γιατί στους συλλογισμούς μας δεν πήραμε υπόψη κάτι βασικό. Εάν κάποια μόρια του υγρού μπορούν να διαφεύγουν από το υγρό σχηματίζοντας ατμό πάνω από την ελεύθερη επιφάνειά του, γιατί να μην μπορεί να συμβεί και το αντίστροφο, δηλαδή κάποια μόρια να περνούν από την αέρια φάση στην υγρή; Εξάλλου το φαινόμενο της υγροποίησης των ατμών είναι εξίσου οικείο με αυτό της εξάτμισης. Οι υδρατμοί της ατμόσφαιρας υγροποιούνται στα τζάμια όταν αυτά είναι κρύα.

Έχουμε λοιπόν δύο ανταγωνιστικά φαινόμενα, αυτό της εξάτμισης και αυτό της υγροποίησης.

Όταν υπάρχει μια δυναμική ισορροπία ανάμεσα στην εξάτμιση και την υγροποίηση (η ποσότητα υγρού που εξατμίζεται είναι ίση με την ποσότητα του ατμού που υγροποιείται στον ίδιο χρόνο), η ποσότητα του υγρού και η ποσότητα του ατμού πάνω από την ελεύθερη επιφάνειά του παραμένουν σταθερές. Ακριβώς αυτό συμβαίνει στην περίπτωση του υγρού μέσα στο κλειστό μπουκάλι.

Η ταχύτητα με την οποία υγροποιείται ο ατμός εξαρτάται από το πόσο χαμηλή είναι η θερμοκρασία και από

την ποσότητα των ατμών πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού.

Όταν η εξάτμιση και η υγροποίηση βρίσκονται σε ισορροπία η ποσότητα των ατμών που βρίσκονται πάνω από την επιφάνεια του υγρού είναι η μέγιστη δυνατή για τις δεδομένες συνθήκες και τον διαθέσιμο χώρο. Τότε οι ατμοί λέγονται **κορεσμένοι**.

Αποκαλύψαμε τώρα, έμμεσα, ένα νέο τρόπο να επιταχύνουμε την εξάτμιση ενός υγρού, εκτός από το να του αυξήσουμε τη θερμοκρασία. Αρκεί να απομακρύνουμε συνεχώς πάνω από την ελεύθερή του επιφάνεια τους ατμούς για να ελαχιστοποιούμε το φαινόμενο της υγροποίησης. Ίσως τώρα καταλαβαίνουμε γιατί ο καλύτερος καιρός για να στεγνώσουν τα απλωμένα ρούχα είναι να κάνει ζέστη αλλά και να φυσάει.

ΣΥΝΟΨΗ

Ισόθερμη είναι η μεταβολή στην οποία η θερμοκρασία του αερίου διατηρείται σταθερή. Ο νόμος της ισόθερμης μεταβολής είναι

$$pV=\text{σταθ.} \quad \text{για} \quad T=\text{σταθ.}$$

Ισόχωρη ονομάζεται η μεταβολή στην οποία ο όγκος του αερίου διατηρείται σταθερός. Ο νόμος της ισόχωρης μεταβολής είναι

$$\frac{p}{T}=\text{σταθ.} \quad \text{για} \quad V=\text{σταθ.}$$

Ισοβαρής ονομάζεται η μεταβολή στην οποία η πίεση του αερίου διατηρείται σταθερή. Ο νόμος της ισοβαρούς μεταβολής είναι

$$\frac{V}{T}=\text{σταθ.} \quad \text{για} \quad p=\text{σταθ.}$$

Η καταστατική εξίσωση συνδέει την πίεση, τον όγκο και τη θερμοκρασία σε ένα ιδανικό αέριο.

$$pV=nRT$$

Μακροσκοπικά, ιδανικό θεωρείται το αέριο στο οποίο η καταστατική εξίσωση ισχύει πάντα.

Μικροσκοπικά, ιδανικό θεωρείται το αέριο του οποίου τα μόρια είναι υλικά σημεία που δεν αλληλεπιδρούν παρά μόνο όταν συγκρούονται. Οι κρούσεις τους με τα άλλα μόρια και με τα τοιχώματα του δοχείου θεωρούνται ελαστικές.

Η πίεση που ασκεί ένα αέριο που βρίσκεται μέσα σε ένα δοχείο οφείλεται στις κρούσεις των μορίων του στα τοιχώματα του δοχείου. Η πίεση του αερίου συνδέεται με τη μέση τιμή των τετραγώνων των ταχυτήτων των μορίων του, με τη σχέση

$$p = \frac{1}{3} \frac{Nm\overline{u^2}}{V}$$

Η θερμοκρασία του αερίου συνδέεται με τη μέση τιμή των τετραγώνων των ταχυτήτων των μορίων με τη σχέση

$$T = \frac{2}{3} \frac{1}{k} \left[\frac{1}{2} m\overline{u^2} \right]$$

Η μέση κινητική ενέργεια των μορίων του ιδανικού αερίου είναι ανάλογη με την απόλυτη θερμοκρασία.

$$\frac{1}{2} m\overline{u^2} = \frac{3}{2} kT$$

Η ενεργός ταχύτητα των μορίων ιδανικού αερίου είναι

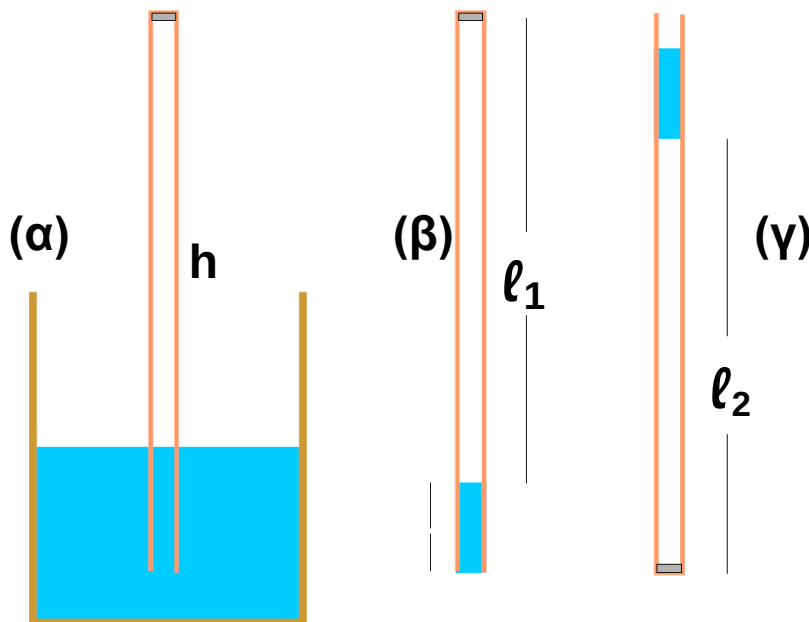
$$u_{\text{εν}} = \sqrt{\overline{u^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

Τα μόρια ενός αερίου δεν έχουν την ίδια ταχύτητα. Οι ταχύτητες των μορίων κάποιας ποσότητας αερίου σε θερμοκρασία T ακολουθούν την κατανομή Maxwell - Boltzmann.

Από την κατανομή Maxwell - Boltzmann για τα αέρια μπορούν να βγουν συμπεράσματα που ερμηνεύουν, ποιοτικά, φαινόμενα όπως η εξαερίωση των υγρών ή η υγροποίηση των ατμών.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ

1.Επαληθεύστε το νόμο του Boyle με ένα καλαμάκι



Σχ. 3.15

Βυθίστε ένα καλαμάκι της πορτοκαλάδας μέσα σε ένα ποτήρι με νερό. Κλείστε το επάνω μέρος του με λίγη πλαστελίνη (σχ.3.15α). Βγάλτε το από το ποτήρι. Θα διαπιστώσετε ότι έχετε πάρει μαζί σας και μια ποσότητα νερού.

Πώς το εξηγείτε αυτό; Πόση είναι η πίεση του αέρα που έχει εγκλωβιστεί στο καλαμάκι;

Αναποδογυρίστε το καλαμάκι. Τώρα ο αέρας που έχει εγκλωβιστεί έχει μικρότερο όγκο. Πόση είναι τώρα η πίεση του αέρα;

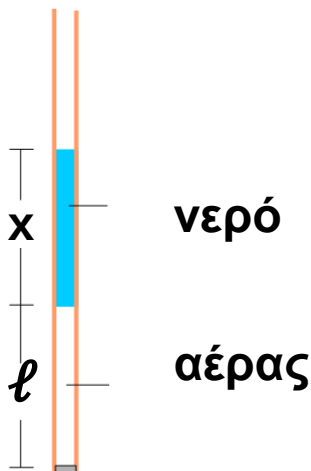
Μετρήστε στις δύο περιπτώσεις την πίεση και τον όγκο του αέρα και ελέγξτε αν ισχύει η σχέση $pV = \text{σταθ.}$

Την ατμοσφαιρική πίεση θα τη θεωρήσετε $1,013 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ και το ειδικό βάρος του νερού 10^4 N/m^3

Υπόδειξη: Ο όγκος του αέρα στο καλαμάκι είναι $V_1 = \ell_1 A$ και $V_2 = \ell_2 A$, όπου A η διατομή που έχει το καλαμάκι. Η πίεση που δημιουργεί μια στήλη υγρού, στη βάση της

είναι εh (ε : το ειδικό βάρος του υγρού και h το ύψος της στήλης του υγρού). Επειδή το καλαμάκι, στο ανοιχτό του άκρο έχει κάθε στιγμή πίεση ίση με την ατμοσφαιρική (p), η πίεση του αέρα που είναι εγκλωβισμένος μέσα στο καλαμάκι είναι $p_1 = p - \varepsilon h$ όταν το ανοιχτό άκρο βρίσκεται προς τα κάτω (σχ. 3.15β) και $p_1 = p + \varepsilon h$ όταν βρίσκεται προς τα πάνω (σχ. 3.15γ)

2. Επαληθεύστε το νόμο της ισοβαρούς μεταβολής



Σχ. 3.16

Πάρτε ένα καλαμάκι της πορτοκαλάδας και κλείστε το ένα άκρο του με πλαστελίνη. Προσπαθήστε να το γεμίσετε με νερό. Θα διαπιστώσετε ότι το νερό που θα ρίξετε δεν γεμίζει το σωλήνα αφού εγκλωβίζεται μια στήλη αέρα. Βάλτε το καλαμάκι σε ένα μπρίκι με νερό, με το κλειστό του άκρο προς τα κάτω. Με ένα μαρκαδόρο σημειώστε το ύψος της στήλης του αέρα για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας (θα τη βρείτε με ένα θερμόμετρο) και δοκιμάστε αν ισχύει η σχέση $\frac{V}{T} = \text{σταθ.}$ (Αρκεί

να ισχύει $\frac{\ell}{T} = \text{σταθ.}$ Γιατί;)

Σημείωση: Προσοχή, μη βάλετε το καλαμάκι σας σε πολύ ζεστό νερό. Είναι πολύ πιθανό να παραμορφωθεί. Εξ άλλου σε ψηλές θερμοκρασίες η τάση των ατμών του νερού είναι συγκρίσιμη με την πίεση του αέρα.

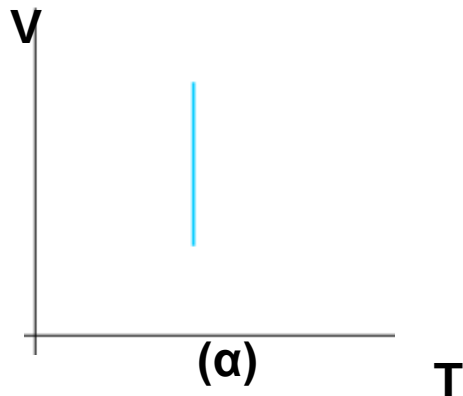
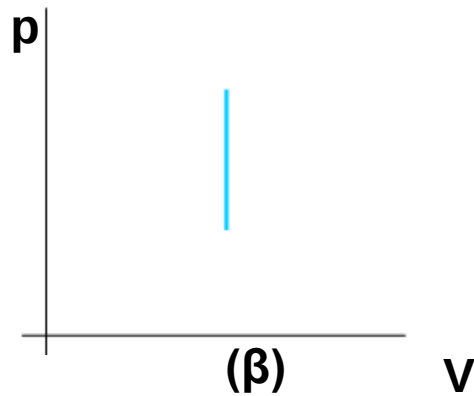
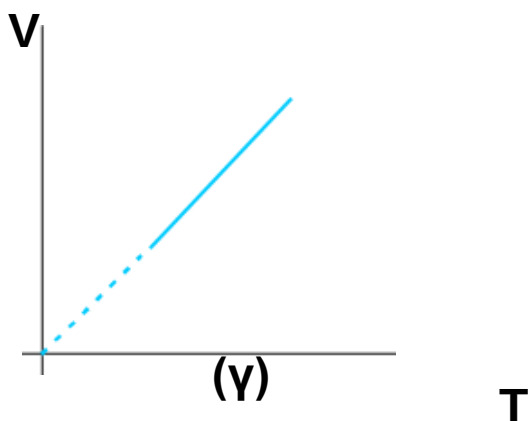
ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

Νόμοι των αερίων

1. Ποιο από τα παρακάτω διαγράμματα αντιστοιχεί

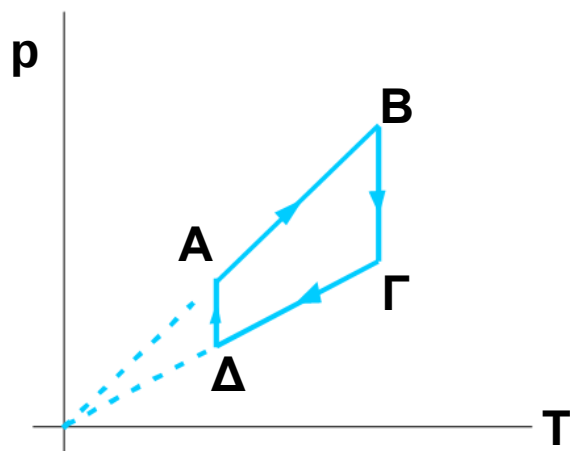
1) σε ισοβαρή, και

2) σε ισόθερμη μεταβολή;



Σχ. 3.17

2.



Σχ. 3.18

Η μεταβολή ABΓΔ που παριστάνεται στο διπλανό διάγραμμα (σχ.1.18) αποτελείται:

α) Από δύο ισόχωρες και δύο ισόθερμες μεταβολές.

- β) Από δύο ισοβαρείς και δύο ισόθερμες μεταβολές.
γ) Από δύο ισοβαρείς και δύο ισόχωρες μεταβολές.
Να επιλέξετε τη σωστή απάντηση.

3 Να αντιστοιχίσετε τις μεταβολές της αριστερής στη-
λης σε σχέσεις της δεξιάς στήλης.

1) Ισόθερμη μεταβολή

α) $\frac{p}{V} = \text{σταθ.}$

2) Ισόχωρη μεταβολή

β) $\frac{p}{T} = \text{σταθ.}$

3) Ισοβαρής μεταβολή

γ) $\frac{V}{T} = \text{σταθ.}$

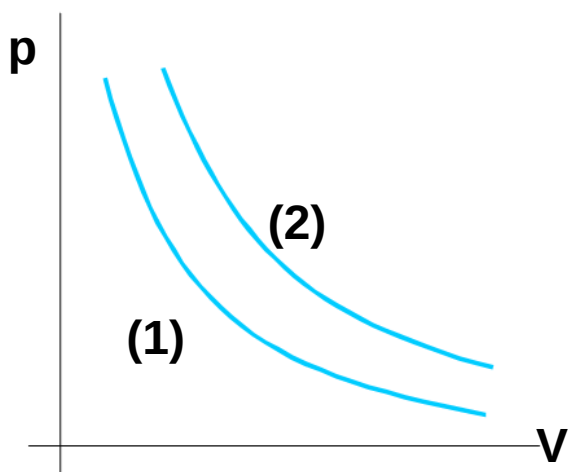
δ) $pV = \text{σταθ.}$

4 Ποσότητα αερίου θερμαίνεται με σταθερό όγκο. Η
πυκνότητά του

- α) Αυξάνεται.
β) Μειώνεται.
γ) Μένει σταθερή.

Ποια απάντηση είναι σωστή;

5



Σχ. 3.19

Στο διάγραμμα p - V του σχήματος 3.19 οι καμπύλες (1) και (2) που αναφέρονται σε ισόθερμη μεταβολή δύο αερίων αντιστοιχούν στην ίδια θερμοκρασία. Αν n_1 και n_2 τα moles των δύο αερίων τότε:

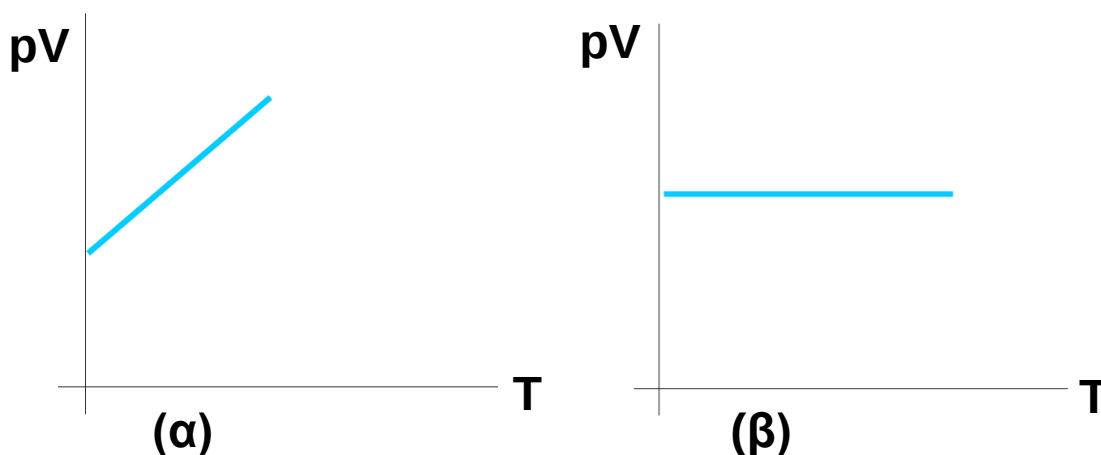
- α) $n_1 = n_2$
- β) $n_1 > n_2$
- γ) $n_1 < n_2$

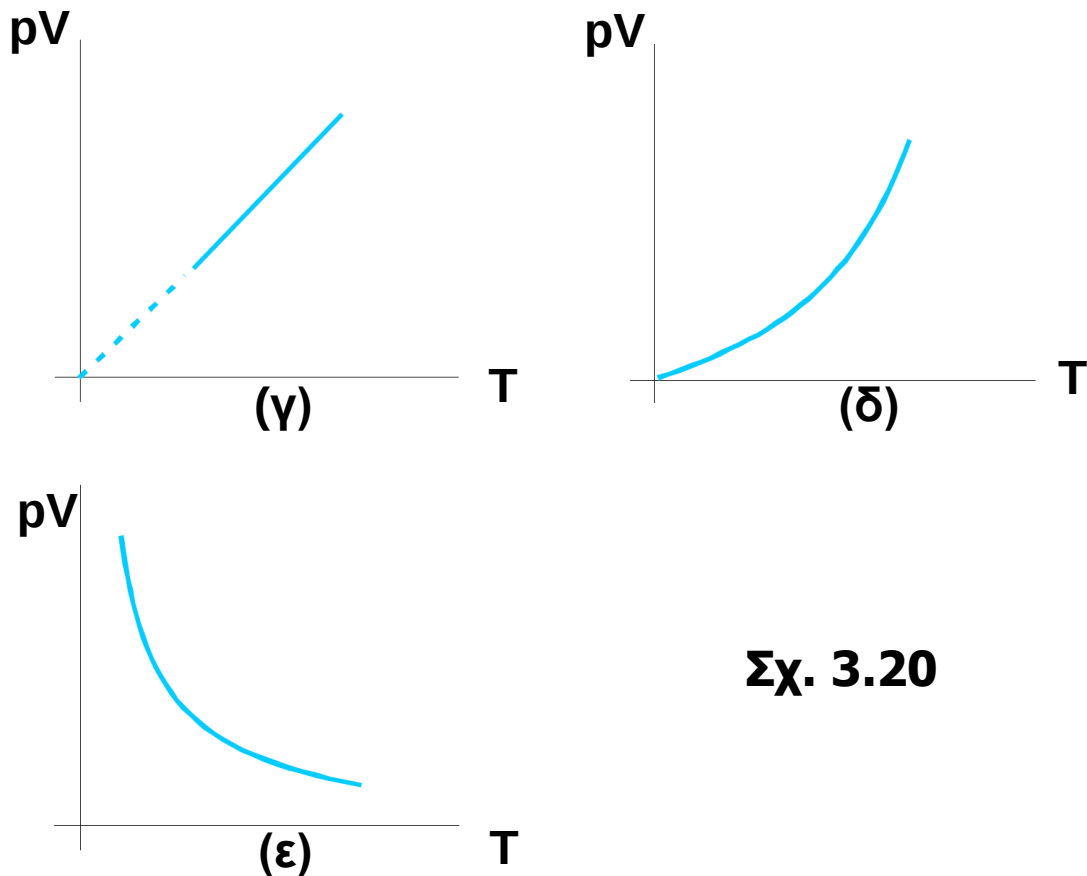
Επιλέξτε το σωστό.

6 Ποιες από τις επόμενες προτάσεις είναι σωστές;

- α) Η καταστατική εξίσωση ισχύει μόνο αν το αέριο αποτελείται από ένα είδος μορίων.
- β) Τα αέρια για τα οποία ισχύει η καταστατική εξίσωση ονομάζονται ιδανικά.
- γ) Σε ορισμένη ποσότητα ιδανικού αερίου η παράσταση $\frac{pV}{T}$ παραμένει σταθερή.
- δ) Η καταστατική εξίσωση ισχύει μόνο στα μονοατομικά αέρια.

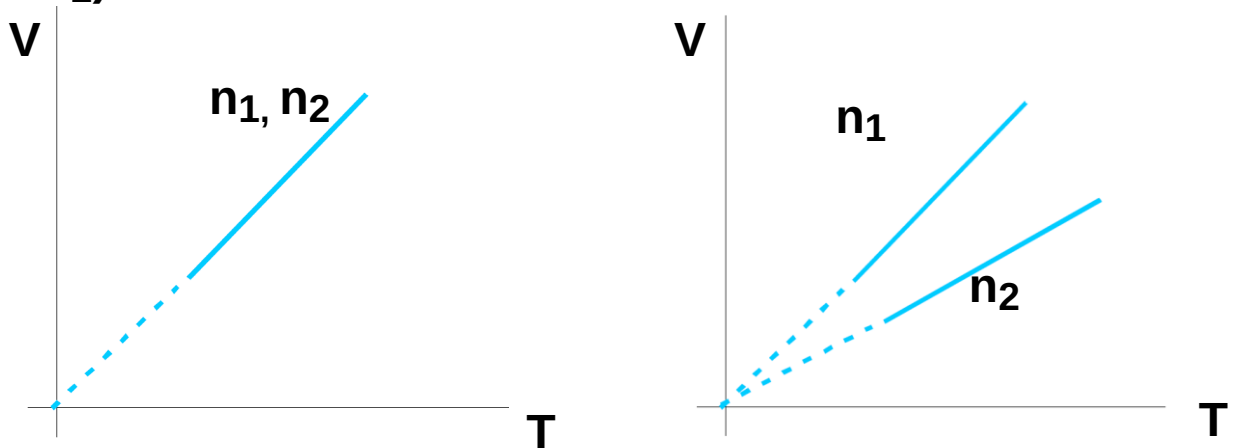
7 Ποιο από τα επόμενα διαγράμματα παριστάνει το γινόμενο pV ορισμένης ποσότητας αερίου σε συνάρτηση με την απόλυτη θερμοκρασία του;

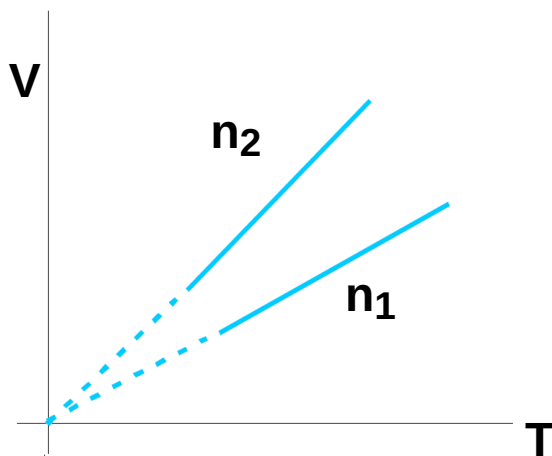




Σχ. 3.20

8 Δύο ποσότητες αερίων με αριθμό γραμμομορίων n_1 και n_2 εκτελούν ισοβαρή μεταβολή στην ίδια πίεση. Ποιο από τα παρακάτω διαγράμματα είναι το σωστό; ($n_1 > n_2$).





Σχ. 3.21

Κινητική θεωρία

- 9 Πώς ορίζεται το ιδανικό αέριο α) μακροσκοπικά και β) μικροσκοπικά;
- 10 Ποιες από τις επόμενες προτάσεις είναι σωστές;
- α) Η θερμοκρασία ενός αερίου είναι ανάλογη με τη μέση κινητική ενέργεια των μορίων του.
 - β) Η πίεση ενός αερίου είναι ανάλογη με τη μέση ταχύτητα των μορίων του.
 - γ) Οι ενεργές ταχύτητες των μορίων του οξυγόνου και του αζώτου είναι ίσες, αν τα δύο αέρια βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία.
 - δ) Η άτακτη κίνηση των μορίων του αέρα είναι πιο "γρήγορη" το καλοκαίρι από ό,τι το χειμώνα.
- 11 Δύο δοχεία περιέχουν οξυγόνο και υδρογόνο αντίστοιχα στην ίδια θερμοκρασία. Η μέση κινητική ενέργεια των μορίων του υδρογόνου είναι:
- α) Ίση με τη μέση κινητική ενέργεια των μορίων του οξυγόνου.
 - β) Το μισό της μέσης κινητικής ενέργειας των μορίων του οξυγόνου.
 - γ) Διπλάσια από τη μέση κινητική ενέργεια των μορίων του οξυγόνου.

- δ) Τετραπλάσια από τη μέση κινητική ενέργεια των μορίων του οξυγόνου.
Επιλέξτε τη σωστή απάντηση.
- 12 Η πίεση που ασκεί ένα αέριο δοχείο είναι ανάλογη με
α) τη μέση τιμή των ταχυτήτων των μορίων.
β) τον όγκο του δοχείου που το περιέχει.
γ) την πυκνότητα του αερίου.
δ) την πίεση που υπάρχει έξω από το δοχείο.
Επιλέξτε τη σωστή απάντηση.
- 13 Αέριο συμπιέζεται ισόθερμα στο μισό του αρχικού του όγκου. Η ενεργός ταχύτητα των μορίων του
α) διπλασιάζεται.
β) παραμένει σταθερή.
γ) υποδιπλασιάζεται.
δ) τα στοιχεία δεν επαρκούν για να κρίνουμε αν η ενεργός ταχύτητα μεταβάλλεται και πώς.
Επιλέξτε τη σωστή απάντηση.
- 14 Ποιες από τις επόμενες προτάσεις που αφορούν στην κατανομή Maxwell – Boltzmann είναι σωστές;
α) Η κατανομή παριστάνεται γραφικά σε διάγραμμα στο οποίο ο ένας άξονας αναφέρεται στις ταχύτητες (u) των μορίων του αερίου και ο άλλος στον αριθμό των μορίων που έχουν κάποια ταχύτητα u .
β) Η κατανομή Maxwell – Boltzmann δείχνει ότι υπάρχει κάποιο όριο στη μέγιστη ταχύτητα που μπορούν να έχουν τα μόρια του αερίου σε κάποια θερμοκρασία.
γ) Τα περισσότερα μόρια έχουν ταχύτητες μεγαλύτερες από την ταχύτητα που αντιστοιχεί στο μέγιστο της καμπύλης.
δ) Η κατανομή των ταχυτήτων των μορίων ενός αερίου είναι ίδια για όλες τις τιμές της θερμοκρασίας του αερίου.

15 Πώς ερμηνεύεται η ελάττωση της θερμοκρασίας όταν ένα υγρό εξατμίζεται;

ΑΣΚΗΣΕΙΣ

Νόμοι των αερίων - καταστατική εξίσωση

16 Δοχείο σταθερού όγκου περιέχει αέρα σε θερμοκρασία $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ και πίεση 1atm . Θερμαίνουμε το δοχείο ώστε η θερμοκρασία του αερίου να αυξηθεί κατά $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Πόση θα γίνει η πίεση;
[Απ : $1,2\text{atm}$]

17 Αέριο βρίσκεται μέσα σε κατακόρυφο κυλινδρικό δοχείο. Το δοχείο κλείνεται με εφαρμοστό έμβολο, πάνω στο οποίο τοποθετούνται διάφορα σταθμά. Το αέριο βρίσκεται σε θερμοκρασία $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ και καταλαμβάνει όγκο $0,20\text{ m}^3$. Ψύχουμε το αέριο στους $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Πόσος θα είναι ο νέος όγκος του αερίου;
[Απ : $0,18\text{ m}^3$]

18 Δωμάτιο έχει διαστάσεις $4\text{m}\times 4\text{m}\times 3\text{m}$. Η θερμοκρασία στο δωμάτιο είναι $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ και η πίεση 1atm . Να υπολογιστεί ο αριθμός των mol του αέρα στο δωμάτιο.
Δίνονται : $1\text{atm} = 1,013\times 10^5\text{ N/m}^2$, $R=8,314\text{ J/molK}$.
[Απ : 1950 mol]

19 Κυλινδρικό δοχείο με διαθερμικά τοιχώματα φράσσεται με εφαρμοστό έμβολο. Το δοχείο περιέχει αέρα πίεσης 1atm και βρίσκεται μέσα σε λουτρό νερού σταθερής θερμοκρασίας. Πιέζουμε το έμβολο ώστε ο όγκος του αερίου να ελαττωθεί στο $1/3$ του αρχικού. Υπολογίστε την τελική τιμή της πίεσης του αερίου.
[Απ : 3atm]

20. 2×10^{-5} mol υδρογόνου βρίσκονται σε δοχείο όγκου $V=0,25\text{m}^3$ σε θερμοκρασία 27°C . Υπολογίστε την πίεση του αερίου. Δίνονται $R=8,314\text{ J/molK}$, $1\text{atm}=1,013 \times 10^5\text{ N/m}^2$.

[Απ : $0,2\text{ N/m}^2$]

21. Αέριο βρίσκεται μέσα σε κυλινδρικό δοχείο. Το πάνω μέρος του δοχείου κλείνεται αεροστεγώς με έμβολο. Ο όγκος του αερίου μέσα στο δοχείο είναι $0,4\text{m}^3$, η θερμοκρασία 300 K και η πίεση του 1atm . Πιέζουμε το έμβολο ώστε ο όγκος του αερίου να γίνει $0,1\text{m}^3$ οπότε παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία του έγινε 600 K . Υπολογίστε την τελική πίεση του αερίου.

[Απ : 8 atm]

22. Στο εργαστήριο μπορούν να επιτευχθούν πολύ χαμηλές πιέσεις (υψηλό κενό), έως $13 \times 10^{-15}\text{ atm}$. Υπολογίστε τον αριθμό των μορίων ενός αερίου σε ένα δοχείο 1L σε αυτή την πίεση και σε θερμοκρασία δωματίου (300K). Δίνονται $R=8,314\text{ J/molK}$,

$N_A=6,023 \times 10^{23}$ μόρια /mol.

[Απ : $3,18 \times 10^8$ μόρια]

23. Να υπολογιστεί η πυκνότητα του διοξειδίου του άνθρακα σε θερμοκρασία 185°C και πίεση 1atm ($1\text{atm}=1,013 \times 10^5\text{ N/m}^2$). Δίνονται η γραμμομοριακή μάζα του διοξειδίου του άνθρακα $44 \times 10^{-3}\text{ kg/mol}$ και $R=8,314\text{ J/molK}$.

[Απ : $1,177\text{ kg/m}^3$]

24. Ένα αέριο θερμαίνεται με σταθερή πίεση. Να γίνει η γραφική παράσταση της σχέσης $p=f(\theta)$, όπου p η πυκνότητα και θ η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου.

25 Σε θερμοκρασία $\theta=27^\circ\text{C}$ και πίεση $p=10^3\text{N/m}^2$ η πυκνότητα ενός αερίου είναι $8\times 10^{-4}\text{kg/m}^3$. Να υπολογιστεί η γραμμομοριακή του μάζα.

Δίνεται $R=8,314\text{ J/molK}$.

[Απ : $2\times 10^{-3}\text{ kg/mol}$]

26 Ένα mol αερίου βρίσκεται σε s.t.p. Διπλασιάζουμε την πίεση διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία και στη συνέχεια τριπλασιάζουμε τον όγκο διατηρώντας σταθερή την πίεση. Να βρεθούν οι τελικές τιμές πίεσης, όγκου, και θερμοκρασίας και να παραστήσετε γραφικά τις μεταβολές του αερίου σε άξονες p - V , p - T , V - T .

[Απ : 2 atm, 33,6 L, 819 K]

Κινητική θεωρία

27 Βρείτε τις ενεργές ταχύτητες (u_{ev}) των μορίων του He και των υδρατμών στους 27°C . Οι αντίστοιχες γραμμομοριακές μάζες είναι $4\times 10^{-3}\text{ kg/mol}$ και $18\times 10^{-3}\text{ kg/mol}$. Δίνεται $R=8,314\text{ J/molK}$.

[Απ : 1368 m/s, 644,8 m/s]

28 Εννιά όμοια σωματίδια έχουν ταχύτητες 3, 5, 8, 8, 8, 12, 12, 16, 20. Όλες οι ταχύτητες είναι μετρημένες σε m/s. Υπολογίστε :

α) τη μέση ταχύτητά τους.

β) την ενεργό τους ταχύτητα u_{ev} .

[Απ : 10,2 m/s 11,4 m/s]

29 Υπολογίστε την ενεργό ταχύτητα των ατόμων του υδρογόνου στην επιφάνεια του Ήλιου όπου η θερμοκρασία είναι 5800K. Δίνεται ότι η γραμμοατομική μάζα του υδρογόνου είναι $1\times 10^{-3}\text{ kg/mol}$ και $R=8,314\text{ J/molK}$.

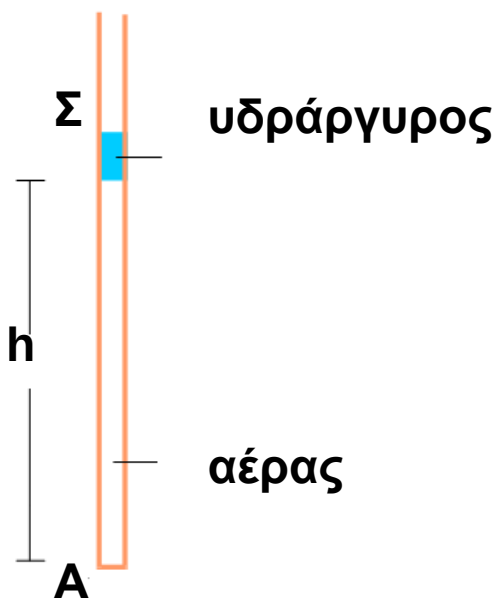
[Απ : 12028m/s]

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

30 Πόσα μπαλόνια όγκου 3 L μπορούμε να φουσκώσουμε με το ήλιο που περιέχεται σε φιάλη όγκου 12 L; Το ήλιο στη φιάλη βρίσκεται υπό πίεση 120 atm, ενώ στα μπαλόνια υπό πίεση 1,2 atm. Υποθέστε ότι τόσο η φιάλη όσο και τα μπαλόνια βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία.

[Απ : 400]

31



Σχ. 3.22

Ο λεπτός κατακόρυφος σωλήνας του σχήματος 3.22 κλείνεται από μια σταγόνα υδραργύρου Σ και στο τμήμα ΑΣ, ύψους $h=27\text{ cm}$, περιέχει αέρα θερμοκρασίας $\theta=27^\circ\text{C}$. Αν η θερμοκρασία του αέρα γίνει $\theta'=127^\circ\text{C}$ πόσο θα μετακινηθεί η σταγόνα; Η μεταβολή του όγκου του σωλήνα με την αύξηση της θερμοκρασίας θεωρείται αμελητέα.

[Απ : 9cm]

32 Κυλινδρικό δοχείο, με τον άξονά του κατακόρυφο, κλείνεται αεροστεγώς στο πάνω μέρος του με έμβολο διατομής $A=0,02\text{m}^2$ και βάρους $w=374\text{ N}$. Το αέριο μέσα στο δοχείο καταλαμβάνει όγκο $0,01\text{m}^3$ και βρίσκεται σε

θερμοκρασία 27°C . Η ατμοσφαιρική πίεση είναι $p_{\text{ατ}}=1\text{atm}$.

α) Πόση είναι η πίεση του αερίου;

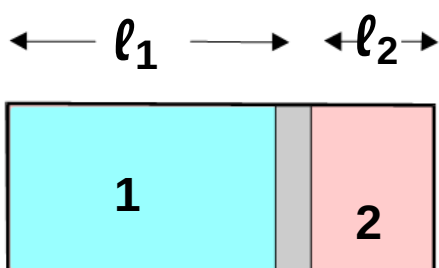
β) Πόσο θα αυξηθεί ο όγκος του αερίου, αν η θερμοκρασία του γίνει 207°C ; ($1\text{atm} = 1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$)
[Απ : α) $1,2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ β) $0,006 \text{ m}^3$]

33 Δοχείο όγκου V , που περιέχει αέρα, έχει στο πάνω μέρος του στρόφιγγα. Αρχικά η στρόφιγγα είναι ανοιχτή και ο αέρας του δοχείου επικοινωνεί με το περιβάλλον.

Η ατμοσφαιρική πίεση είναι $p_{\text{ατ}}=1\text{atm}$. Θερμαίνουμε το δοχείο, με ανοιχτή τη στρόφιγγα, μέχρι η θερμοκρασία στο εσωτερικό του να γίνει 410 K . Κλείνουμε τη στρόφιγγα, τοποθετούμε το δοχείο σε λουτρό νερού – πάγου. Να υπολογιστεί η τελική πίεση στο εσωτερικό του δοχείου. Η θερμοκρασία στην οποία συνυπάρχει νερό και πάγος είναι $T=273 \text{ K}$.

[Απ : $0,66 \text{ atm}$]

34

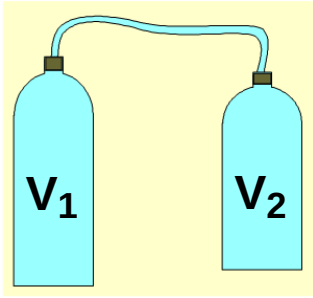


Σχ. 3.23

Ο κύλινδρος του σχήματος 3.23 χωρίζεται σε δυο μέρη, μέσω εμβόλου που κινείται χωρίς τριβή. Στο τμήμα 1 εισάγονται 2 mg H_2 ενώ στο 2 εισάγονται 8 mg O_2 . Ποιος είναι ο λόγος l_1 / l_2 στην κατάσταση ισορροπίας; Τα αέρια στην κατάσταση ισορροπίας βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία. Οι γραμμομοριακές μάζες για το H_2 και το O_2 είναι $2 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ και $32 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$, αντίστοιχα.

[Απ : 4]

35

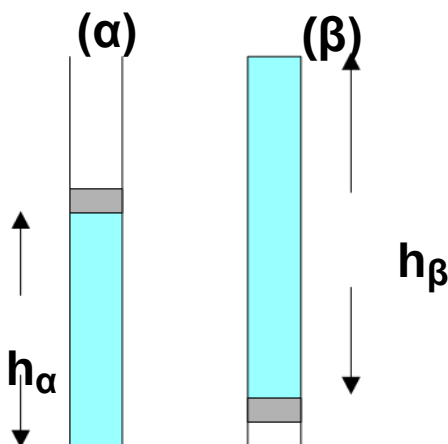


Σχ. 3.24

Δύο δοχεία με όγκους $V_1=0,3 \text{ L}$ και $V_2=0,2 \text{ L}$ συνδέονται με λεπτό σωλήνα αμελητέου όγκου. Τα δοχεία περιέχουν αέρα θερμοκρασίας $T=300 \text{ K}$ (σχ. 3.24). Αυξάνουμε τη θερμοκρασία στο πρώτο δοχείο κατά 100 βαθμούς και στο δεύτερο κατά 50 . Αν η αρχική πίεση ήταν 1 atm να υπολογιστεί η τελική της τιμή.

[Απ : $1,26 \text{ atm}$]

36



Σχ. 3.25

Το κυλινδρικό δοχείο του σχήματος 3.25 έχει τον άξονά του κατακόρυφο, περιέχει αέρα και κλείνεται με έμβολο. Όταν το δοχείο τοποθετηθεί με τη βάση του προς τα κάτω (σχ.3.25α) το ύψος της στήλης του εγκλωβισμένου αέρα είναι $h_\alpha=40 \text{ cm}$. Αν το δοχείο αναστραφεί (σχ.3.25β) το ύψος της στήλης γίνεται $h_\beta=60 \text{ cm}$. Να υπολογιστεί το βάρος του εμβόλου.

Δίνονται $\rho_{\text{ατμ}}=1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ και η διατομή του εμβόλου $A=10 \text{ cm}^2$. Η μεταβολή θα θεωρηθεί ισόθερμη.

[Απ : $20,26 \text{ N}$]



Η ΕΝΕΡΓΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΩΝ ΜΟΡΙΩΝ ΑΕΡΙΟΥ ΕΙΝΑΙ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ

(ΑΠΟΔΕΙΞΗ)

Έστω ότι οι ταχύτητες των μορίων είναι u_i , όπου $i=1,2,\dots,N$

Υπενθυμίζουμε ότι $\bar{u} = \frac{u_1 + u_2 + \dots + u_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i$

Και $u_{\text{εV}} = \sqrt{\frac{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_N^2}{N}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i^2}$

Σχηματίζουμε την παράσταση

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i^2 - \bar{u}^2 \quad \text{για την οποία ισχύει } A > 0$$

Η παράσταση γράφεται με τη μορφή

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(u_i^2 - 2u_i\bar{u} + \bar{u}^2 \right) \quad \text{ή}$$

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2u_i\bar{u} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{u}^2 \quad \text{ή}$$

$$A = u_{\text{εV}}^2 - 2\bar{u} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i + \frac{1}{N} N\bar{u}^2 \quad \text{ή}$$

$$A = u_{\text{εV}}^2 - 2\bar{u}^2 + \bar{u}^2 = u_{\text{εV}}^2 - \bar{u}^2$$

$$\text{όμως } A \geq 0 \quad \text{άρα } u_{\text{εV}}^2 - \bar{u}^2 \geq 0 \quad \text{ή} \quad u_{\text{εV}}^2 \geq \bar{u}^2$$

επειδή $u_{\text{εV}} > 0$ και $\bar{u} > 0$ τελικά

$$u_{\text{εV}} \geq \bar{u}$$

Η ισότητα ισχύει μόνο στην περίπτωση που όλα τα μόρια έχουν την ίδια κατά μέτρο ταχύτητα, κάτι που για

μεγάλους πληθυσμούς μορίων είναι απολύτως αδύνατο. Από τη μαθηματική επεξεργασία της συνάρτησης $\frac{dN}{du} = f(u)$ που δίνει την κατανομή Maxwell-Boltzmann προκύπτει, για ένα αέριο γραμμομοριακής μάζας M σε θερμοκρασία T , ότι

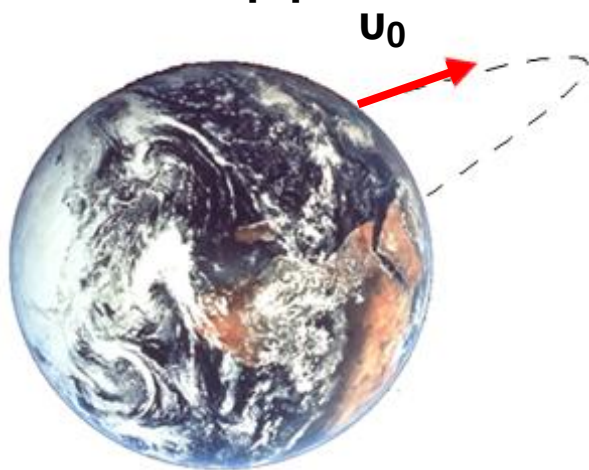
$$u_{\pi} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} \quad \bar{u} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad u_{\epsilon v} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$



ΓΙΑΤΙ ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΤΗΣ ΓΗΣ

Η κινητική θεωρία των αερίων μάς επιτρέπει να εξηγήσουμε γιατί δεν υπάρχει υδρογόνο στην ατμόσφαιρα της Γης, στην οποία δεσπόζουν το οξυγόνο και το άζωτο.

Η ερμηνεία σχετίζεται με την ταχύτητα διαφυγής από τη Γη, κάτι που θα μας απασχολήσει στην παράγραφο 5-13 αυτού του βιβλίου.



Σχ. 3.26 Εάν το σώμα βληθεί με ταχύτητα μικρότερη από την ταχύτητα διαφυγής επιστρέφει στην επιφάνεια της Γης.

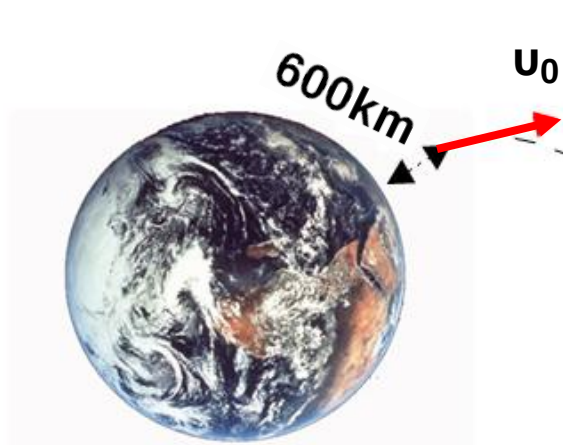
Όταν ένα σώμα βάλλεται από ένα σημείο της επιφάνειας της Γης με αρχική ταχύτητα u_0 κάνει ευθύγραμμη ή καμπυλόγραμμη κίνηση και επιστρέφει σε αυτή (σχ. 3.26). Δεν θα επέστρεφε στη Γη μόνο αν η αρχική του ταχύτητα έπαιρνε την τιμή 11,2 km/s. Αυτή την ταχύτητα τη λέμε ταχύτητα διαφυγής από την επιφάνεια της

Γης. Στο ύψος των 600 km, στα όρια δηλαδή της ατμόσφαιρας της Γης η ταχύτητα διαφυγής έχει τιμή 10,8 km/s (σχ. 3.27).

Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας στο ύψος αυτό είναι περίπου 1500 K. Στη θερμοκρασία αυτή, όπως προκύ-

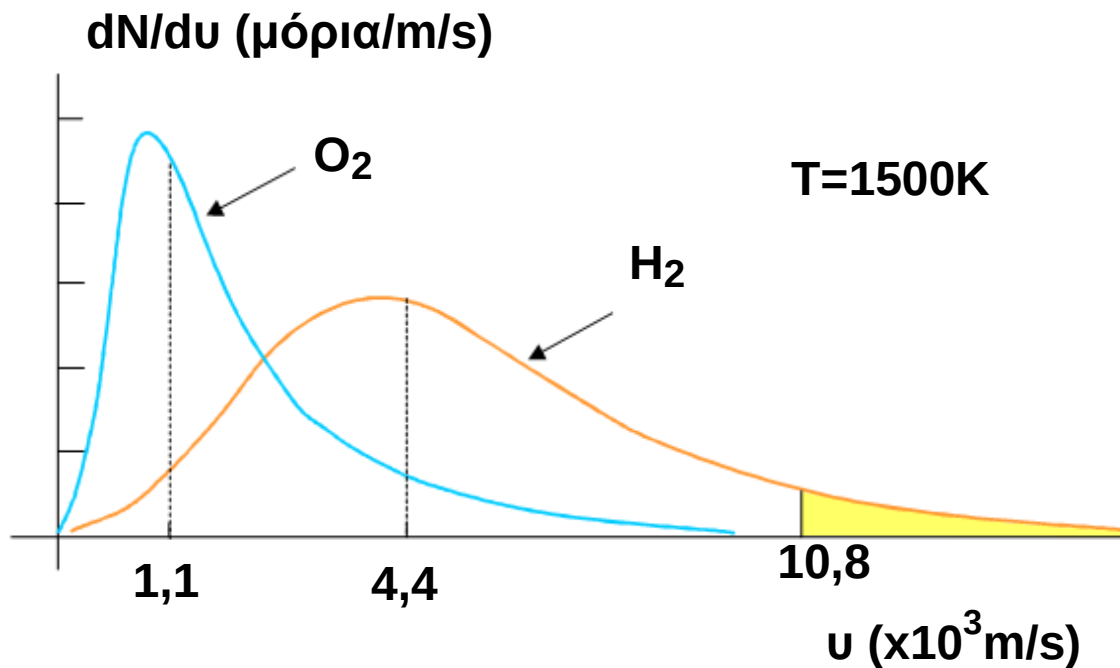
πτει από τη σχέση $u_{\text{εν}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$ τα μόρια του οξυγόνου θα

είχαν ενεργό ταχύτητα 1,1 km/s και τα μόρια του υδρογόνου ενεργό ταχύτητα 4,4 km/s.



Σχ. 3.27 Εάν το σώμα βληθεί με ταχύτητα μεγαλύτερη ή ίση από την ταχύτητα διαφυγής και η κατεύθυνση της αρχικής ταχύτητας είναι κατάλληλη, τότε διαφεύγει οριστικά στο διάστημα.

Ας υποθέσουμε ότι σ' αυτό το ύψος βρίσκεται μια ποσότητα N μορίων οξυγόνου και N μορίων υδρογόνου. Από το διάγραμμα της κατανομής των ταχυτήτων κατά Maxwell- Boltzmann, για τα δύο αέρια (σχ. 3.28) προκύπτει ότι, πρακτικά, κανένα μόριο του οξυγόνου δεν έχει ταχύτητα ίση με την ταχύτητα διαφυγής και έτσι όλη η ποσότητα του οξυγόνου παραμένει στη γήινη ατμόσφαιρα. Αντίθετα, υπάρχει μεγάλος αριθμός μορίων υδρογόνου τα οποία έχουν ταχύτητες μεγαλύτερες από την ταχύτητα διαφυγής. Φυσικά δε διαφεύγουν όλα αυτά τα μόρια. Διαφεύγουν μόνο εκείνα που η ταχύτητά τους έχει τον κατάλληλο προσανατολισμό, με την προϋπόθεση ότι δε συγκρούονται με άλλα μόρια.

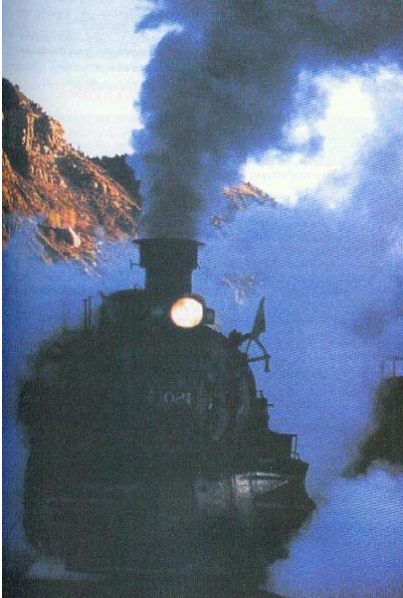


Σχ. 3.28

Στο διάστημα των 4×10^9 ετών που πέρασαν από τότε που δημιουργήθηκε το πλανητικό μας σύστημα, το υδρογόνο που υπήρχε αρχικά, διαχεόμενο στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, διέφυγε σιγά - σιγά από το βαρυτικό πεδίο.

Παρατήρηση: Με τον ίδιο τρόπο εξηγείται γιατί η Σελήνη - στην οποία η ταχύτητα διαφυγής από την επιφάνεια είναι $2,37 \text{ km/s}$ - δεν έχει καθόλου ατμόσφαιρα και γιατί στον Άρη (ταχύτητα διαφυγής από την επιφάνεια $4,97 \text{ km/s}$) η ατμόσφαιρα είναι πολύ αραιή.

(4 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ)



- 4.1 Εισαγωγή
- 4.2 Θερμοδυναμικό σύστημα
- 4.3 Ισορροπία θερμοδυναμικού συστήματος
- 4.4 Αντιστρεπτές μεταβολές
- 4.5 Έργο παραγόμενο από αέριο κατά τη διάρκεια μεταβολών όγκου
- 4.6 Θερμότητα
- 4.7 Εσωτερική ενέργεια
- 4.8 Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος
- 4.9 Εφαρμογή του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου σε ειδικές περιπτώσεις
- 4.10 Γραμμομοριακές ειδικές θερμότητες αερίων
- 4.11 Θερμικές μηχανές
- 4.12 Δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος
- 4.13 Η μηχανή του Carnot
- 4.14 Εντροπία
- 4.15 Υπολογισμός της μεταβολής της εντροπίας σε μερικές περιπτώσεις

4-1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο όρος θερμοδυναμική προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις θερμότητα και δύναμη.

Αν και η πρώτη θερμική μηχανή, που είναι ιστορικά γνωστή, κατασκευάστηκε από τον Έρωνα τον Αλεξανδρινό περίπου το 100 μ.Χ., αφετηρία για την ανάπτυξη της θερμοδυναμικής στάθηκε η εφεύρεση της ατμομηχανής και οι προσπάθειες που ακολούθησαν για τη βελτίωση και τελειοποίηση των μηχανών που μετέτρεπαν τη θερμότητα σε ωφέλιμο έργο. Η θερμοδυναμική μελετάει τη μετατροπή της θερμότητας σε μηχανικό έργο και τους περιορισμούς που η φύση έχει επιβάλει.



Εικ. 4.1 Σχέδιο του ατμοστρόβιλου που επινόησε ο αρχαίος Έλληνας εφευρέτης Έρων (Αλεξάνδρεια, περ. 100 μ.Χ.). Το δοχείο είναι κλειστό και επικοινωνεί με τη σφαίρα με τους δύο κατακόρυφους σωλήνες. Με βρασμό νερού παράγεται ατμός στο δοχείο που εισέρχεται από τους σωλήνες στη σφαίρα και εξέρχεται με μεγάλη ταχύτητα από τα δύο ακροφύσια θέτοντας σε περιστροφή τη σφαίρα.

Από την εποχή που εφευρέθηκε η πρώτη ατμομηχανή μέχρι σήμερα έχουν περάσει πολλά χρόνια. Η πρόοδος της θερμοδυναμικής οδήγησε στην κατασκευή όλων των σύγχρονων θερμικών μηχανών, βενζινοκινητήρων, πετρελαιοκινητήρων, κινητήρων αεροσκαφών, ατμοστρόβιλων.

4-2 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα χρησιμοποιούμε συχνά τον όρο **θερμοδυναμικό σύστημα**. Γενικά, **σύστημα** είναι ένα τμήμα του φυσικού κόσμου που διαχωρίζεται από τον υπόλοιπο κόσμο με πραγματικά ή νοητά τοιχώματα. Ο υπόλοιπος φυσικός κόσμος αποτελεί το **περιβάλλον** του συστήματος.

Αν κατά τη μελέτη ενός συστήματος, για την περιγραφή του χρησιμοποιούμε μόνο μεγέθη της μηχανικής, π.χ. δύναμη, ταχύτητα, επιτάχυνση, ορμή κ.λ.π. το σύστημα χαρακτηρίζεται **μηχανικό**. Στην περίπτωση που για την περιγραφή του χρησιμοποιούνται και **θερμοδυναμικά μεγέθη**, όπως θερμότητα, θερμοκρασία, εσωτερική ενέργεια και άλλα, το **σύστημα χαρακτηρίζεται θερμοδυναμικό**.

Εμείς θα ασχοληθούμε με τα απλούστερα θερμοδυναμικά συστήματα, δηλαδή **αέρια** που βρίσκονται μέσα σε δοχεία στο εσωτερικό των οποίων δε γίνονται χημικές αντιδράσεις. Ένα τέτοιο σύστημα θα χαρακτηρίζεται **θερμικά μονωμένο** ή απλά **μονωμένο** αν τα τοιχώματα του δοχείου δεν επιτρέπουν τη μεταφορά θερμότητας από το αέριο προς το περιβάλλον ή αντίστροφα.

4-3 ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Για να περιγραφεί ένα θερμοδυναμικό σύστημα χρειάζεται να γνωρίζουμε κάποια στοιχεία του. Για παράδειγμα, ορισμένη ποσότητα αερίου που βρίσκεται σε ένα δοχείο μπορεί να περιγραφεί αν γνωρίζουμε τον όγκο του, τη θερμοκρασία του και την πίεσή του. Τα στοιχεία αυτά ονομάζονται **θερμοδυναμικές μεταβλητές**.

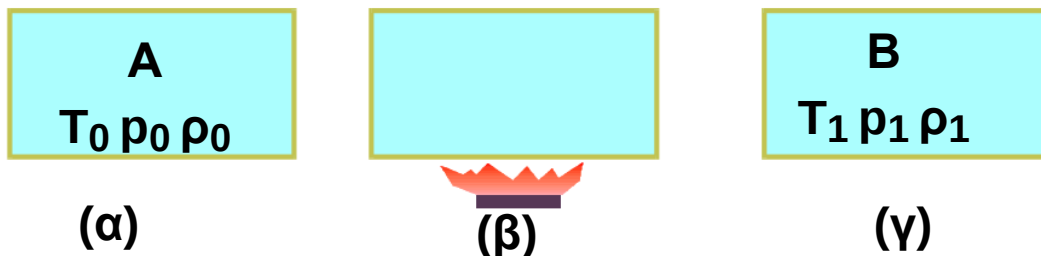
Ο όγκος, η πίεση και η θερμοκρασία ορισμένης ποσότητας αερίου σχετίζονται μεταξύ τους με την

καταστατική εξίσωση. Για να περιγράψουμε την κατάσταση συγκεκριμένης ποσότητας αερίου αρκούν δύο από αυτά αφού το τρίτο προκύπτει από την καταστατική εξίσωση. Οι δύο ποσότητες που είναι ικανές για την περιγραφή της κατάστασης ορισμένης ποσότητας αερίου αποτελούν τις ανεξάρτητες θερμοδυναμικές μεταβλητές του συστήματος.

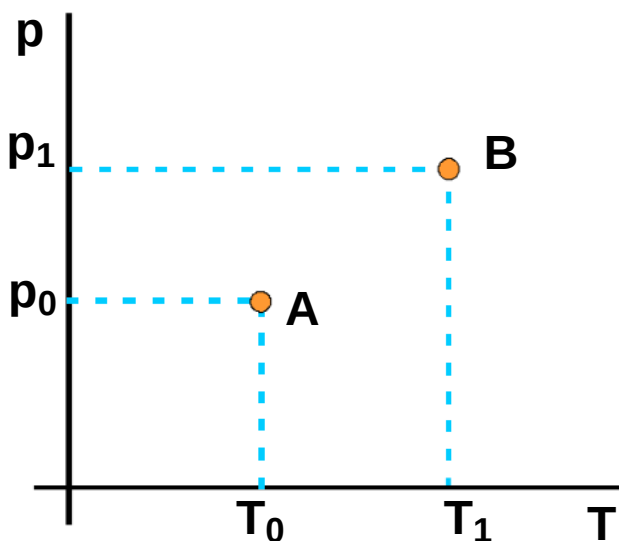
Όταν σ' ένα θερμοδυναμικό σύστημα οι θερμοδυναμικές μεταβλητές που το περιγράφουν διατηρούνται σταθερές με το χρόνο, το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Σε αντίθετη περίπτωση το σύστημα μεταβάλλεται.

Ειδικότερα, λέμε ότι

μια ποσότητα αερίου βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας ή απλά ισορροπίας όταν η πίεση (p), η πυκνότητα (ρ) και η θερμοκρασία του (T) έχουν την ίδια τιμή σε όλη την έκταση του αερίου.



Σχ. 4.1 (α) Το αέριο βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. (β) Το αέριο δε βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Η θερμοκρασία, η πίεση και η πυκνότητα δεν έχουν την ίδια τιμή σε όλη του την έκταση. (γ) Το αέριο βρίσκεται σε νέα κατάσταση ισορροπίας



Σχ. 4.2 Η αρχική κατάσταση του αερίου του σχήματος 2.1 παριστάνεται με ένα σημείο το A και η τελική κατάσταση του, που είναι κατάσταση ισορροπίας, με το σημείο B.

Η κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας ενός αερίου μπορεί να παρασταθεί γραφικά με ένα σημείο σε σύστημα συντεταγμένων με άξονες δύο ανεξάρτητες θερμοδυναμικές μεταβλητές του συστήματος. Αν το σύστημα δε βρίσκεται σε ισορροπία η κατάστασή του δε μπορεί να αποδοθεί γραφικά αφού δε μπορούμε να μιλήσουμε για πίεση ή θερμοκρασία του συστήματος. Η πίεση και η θερμοκρασία έχουν διαφορετικές τιμές στα διάφορα σημεία του αερίου.

Η κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας ενός συστήματος μπορεί να παρασταθεί γραφικά με ένα σημείο. Ένα σύστημα που δε βρίσκεται σε ισορροπία δεν παριστάνεται γραφικά.

4-4 ΑΝΤΙΣΤΡΕΠΤΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ

Όταν σε ένα θερμοδυναμικό σύστημα πραγματοποιείται μια μεταβολή αλλάζουν τόσο το σύστημα όσο και το περιβάλλον του συστήματος.

Αντιστρεπτή ονομάζεται εκείνη η μεταβολή κατά την οποία υπάρχει η δυνατότητα επαναφοράς του συστήματος και του περιβάλλοντος στην αρχική τους κατάσταση.

Οι μεταβολές στη φύση δεν είναι αντιστρεπτές. Η αντίστροφη πορεία ενός φαινομένου είναι αυτό που θα βλέπαμε εάν κινηματογραφούσαμε το φαινόμενο και παίζαμε την ταινία ανάποδα προς τα πίσω. Εάν κινηματογραφούσαμε ένα κερί που καίγεται θα ήταν αποδεκτή η αντίστροφη πορεία, δηλαδή ένα κερί που το μήκος του αυξάνεται; Η αντίστροφη πορεία στην ανάπτυξη ενός φυτού θα ήταν το φυτό να μικραίνει μέχρι να ξαναγίνει σπόρος. Είμαστε τόσο εξοικειωμένοι με τη μη αντιστρεπτικότητα των μεταβολών στη φύση ώστε η αντίστροφη πορεία ενός φαινομένου φαίνεται να παραβιάζει την κοινή λογική.

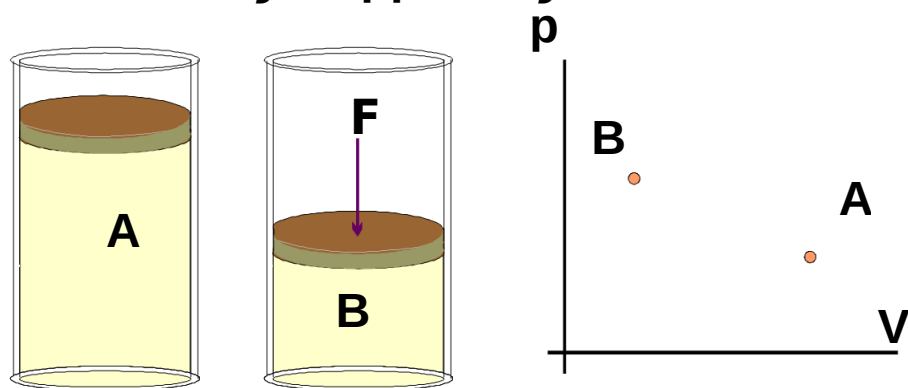


Εικ. 4.2 Για το αβγό της φωτογραφίας δεν υπάρχει καμιά δυνατότητα να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση.

Όμως, η έννοια της αντιστρεπτής μεταβολής είναι χρήσιμη. Έστω λοιπόν, ένα αέριο που βρίσκεται μέσα σε κύλινδρο. Ο κύλινδρος κλείνεται στο πάνω μέρος του με εφαρμοστό έμβολο. Το αέριο μέσα στο δοχείο βρίσκεται σε ισορροπία. Η θερμοκρασία του είναι T_A , ο όγκος που καταλαμβάνει V_A και η πίεση που ασκεί p_A . Θα μεταβάλουμε την κατάσταση του αερίου ώστε ο όγκος του να μειωθεί σε V_B και η πίεση και η θερμοκρασία να πάρουν τελικά τις τιμές p_B και T_B .

Από τους πολλούς τρόπους με τους οποίους μπορεί να πραγματοποιηθεί η μεταβολή επιλέγουμε δυο ακραίες περιπτώσεις:

Στην πρώτη πιέζουμε απότομα το έμβολο ώστε ο όγκος του αερίου να μειωθεί στην επιθυμητή τιμή και περιμένουμε μέχρι να αποκατασταθεί ισορροπία στο αέριο. Στη διάρκεια της μεταβολής αυτής το αέριο βρίσκεται σε αναταραχή, η πίεση και η θερμοκρασία του δεν είναι ίδιες σε όλη την έκτασή του και επομένως δε μπορούμε να παραστήσουμε τη μεταβολή σε διάγραμμα. Σε διάγραμμα μπορεί να παρασταθεί μόνο η αρχική και η τελική κατάσταση του αερίου, που είναι καταστάσεις ισορροπίας.



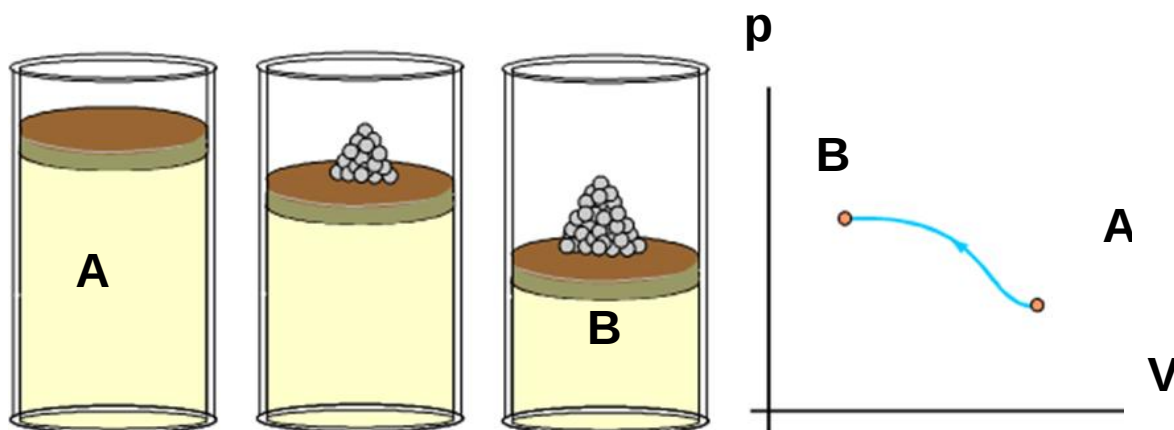
Σχ. 4.3 Πιέζουμε απότομα το έμβολο ώστε το αέριο να μεταβεί στην κατάσταση B. Η μεταβολή δεν είναι αντιστρεπτή. Στο διάγραμμα μπορεί να παρασταθεί μόνο η αρχική και η τελική κατάσταση του αερίου.

Στη δεύτερη περίπτωση ρίχνουμε πρώτα λίγους κόκκους άμμου πάνω στο έμβολο. Αυτό θα μειώσει ελάχιστα τον όγκο του αερίου. Περιμένουμε λίγο ώστε να ισορροπήσει το αέριο. Η νέα κατάσταση ισορροπίας βρίσκεται πολύ κοντά στη αρχική. Αν απεικονίζαμε γραφικά τη νέα κατάσταση ισορροπίας θα προέκυπτε ένα σημείο πολύ κοντά στο σημείο που απεικονίζει την αρχική κατάσταση ισορροπίας. Στη συνέχεια ρίχνουμε πάλι λίγους κόκκους άμμου πάνω στο έμβολο, μειώνοντας ακόμα λίγο τον όγκο, περιμένουμε πάλι να αποκα-

τασταθεί κατάσταση ισορροπίας, κ.ο.κ. Επαναλαμβάνοντας συνεχώς αυτή τη διαδικασία φέρνουμε το σύστημα στην τελική κατάσταση.

Κατά τη διάρκεια αυτής της μεταβολής το σύστημα περνάει από διαδοχικές καταστάσεις που μπορούμε να τις θεωρήσουμε καταστάσεις ισορροπίας.

Κάθε μια από αυτές μπορεί να παρασταθεί γραφικά με ένα σημείο. Εφόσον η μια κατάσταση ισορροπίας διαδέχεται την άλλη, τα σημεία στο διάγραμμα θα βρίσκονται το ένα δίπλα στο άλλο με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια γραμμή που ξεκινάει από την αρχική κατάσταση και οδηγεί στην τελική. Με αντίστροφους χειρισμούς, αφαιρώντας δηλαδή άμμο από το έμβολο, το σύστημα θα οδηγηθεί πάλι στην αρχική του κατάσταση.



Σχ. 4.4 Προσθέτουμε στο έμβολο αργά κόκκους άμμου μέχρι το αέριο να φτάσει στην τελική κατάσταση B. Το αέριο μεταβαίνει από την κατάσταση A στη B μέσω διαδοχικών καταστάσεων που μπορούν να θεωρηθούν καταστάσεις ισορροπίας. Η μεταβολή αυτή είναι αντιστρεπτή και παριστάνεται με μια γραμμή που οδηγεί από την αρχική στην τελική κατάσταση.

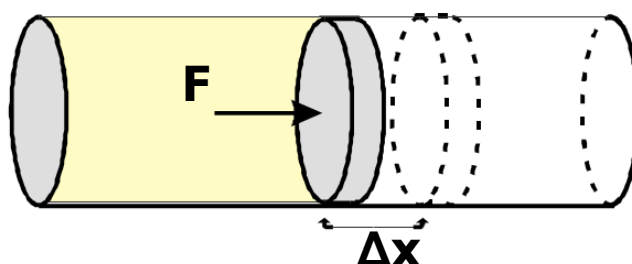
Η μεταβολή που περιγράψαμε αποτελεί μια εξιδανίκευση, δεν είναι δυνατόν ένα σύστημα να βρίσκεται

διαρκώς σε ισορροπία και ταυτόχρονα σιγά σιγά να μεταβάλλεται.

Μια τέτοια εξιδανικευμένη μεταβολή κατά την οποία ένα σύστημα μεταβαίνει από μια αρχική κατάσταση σε μια τελική μέσω διαδοχικών καταστάσεων ισορροπίας θα την ονομάζουμε αντιστρεπτή. Μια τέτοια μεταβολή είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί και αντίστροφα.

Μια αντιστρεπτή μεταβολή παριστάνεται γραφικά με μια συνεχή γραμμή. Οι μη αντιστρεπτές μεταβολές δε μπορούν να παρασταθούν γραφικά.

4-5 ΕΡΓΟ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ ΑΠΟ ΑΕΡΙΟ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΟΓΚΟΥ



Σχ. 4.5 Το αέριο εκτονώνεται και το έμβολο μετατοπίζεται κατά Δx . Η δύναμη F που ασκεί το αέριο στο έμβολο παράγει έργο ΔW .

Έστω ένα αέριο σε κύλινδρο που κλείνεται από ελαστικό έμβολο. Οι μηχανές εσωτερικής καύσης, οι ατμομηχανές, οι συμπιεστές στα ψυγεία και τα κλιματιστικά μηχανήματα χρησιμοποιούν κάποια παραλλαγή τέτοιου συστήματος.

Καθώς τα μόρια του αερίου μέσα στον κύλινδρο συγκρούονται με τα τοιχώματα του κυλίνδρου ασκούν δυνάμεις σ' αυτά. Έστω F η ολική δύναμη που ασκεί το αέριο στο έμβολο. Αν το έμβολο μετακινηθεί προς τα

έξω κατά την πολύ μικρή απόσταση Δx , το έργο που παράγει η δύναμη που ασκεί το αέριο είναι:

$$\Delta W = F \Delta x \quad (4.1)$$

Αν το εμβαδόν του εμβόλου είναι A και η πίεση του αερίου p , ισχύει

$$p = \frac{F}{A} \quad \text{ή} \quad F = p A$$

και η σχέση (4.1) γίνεται

$$\Delta W = p A \Delta x \quad (4.2)$$

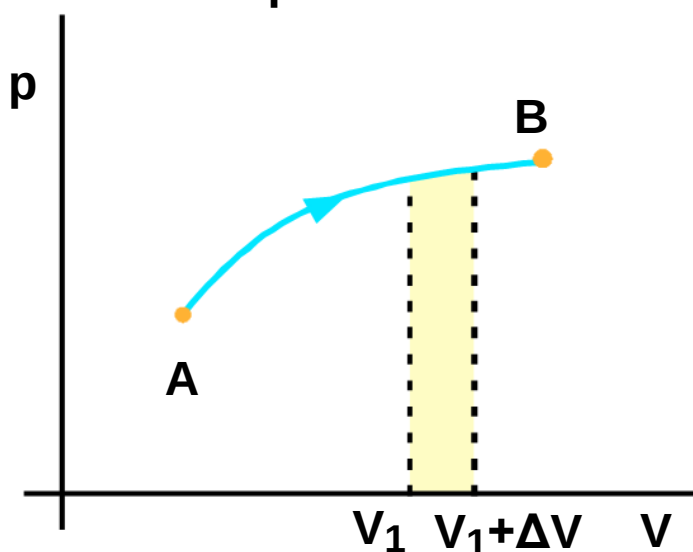
Όμως

$$A \Delta x = \Delta V$$

όπου ΔV η πολύ μικρή μεταβολή του όγκου του αερίου. Έτσι μπορούμε να εκφράσουμε το έργο που παράγει το αέριο

$$\Delta W = p \Delta V \quad (4.3)$$

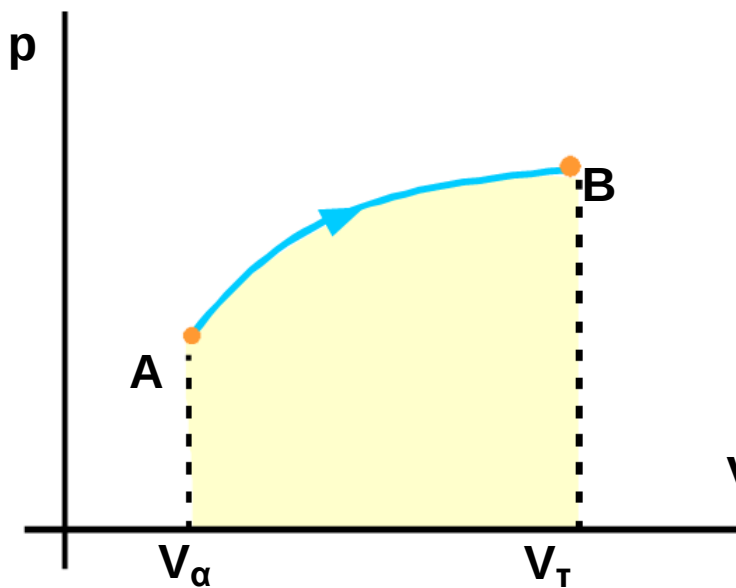
Σύμφωνα με τη σχέση (4.3) το έργο είναι θετικό αν το αέριο εκτονώνεται (αυξάνει ο όγκος του) και αρνητικό αν το αέριο συμπιέζεται. Προσοχή: στο έμβολο μπο-ρεί να ασκούνται και πολλές άλλες δυνάμεις. Η σχέση (4.3) δίνει το έργο της δύναμης που ασκεί το αέριο.



Σχ. 4.6 Σε μια τυχαία αντιστρεπτή μεταβολή το έργο κατά την εκτόνωση του αερίου από όγκο V_1 σε όγκο $V_1 + \Delta V$ είναι ίσο με το εμβαδόν της επιφάνειας με το κίτρινο χρώμα.

Έστω τώρα μια τυχαία αντιστρεπτή μεταβολή κατά την οποία το αέριο μεταβαίνει από την αρχική κατάσταση A στην τελική κατάσταση B (σχ.4.6). Αν η βάση (ΔV) της επιφάνειας με το κίτρινο χρώμα στο σχήμα 4.6 είναι πολύ μικρή, η επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί παραλληλόγραμμο. Το εμβαδόν της, που ισούται με το γινόμενο βάση $\times$ ύψος $= \Delta V \cdot p = \Delta W$, δίνει το έργο του αερίου κατά την εκτόνωσή του, από όγκο V_1 σε όγκο $V_1 + \Delta V$.

Αν χωρίσουμε την επιφάνεια κάτω από τη γραμμή του διαγράμματος σε στοιχειώδεις τέτοιες επιφάνειες και αθροίσουμε τα εμβαδά θα πάρουμε το έργο του αερίου κατά την μεταβολή του από την κατάσταση A στην κατάσταση B (σχ. 4.7).



Σχ. 4.7 Σε μια τυχαία αντιστρεπτή μεταβολή το έργο του αερίου κατά τη μεταβολή του από το A στο B είναι ίσο με το εμβαδόν κάτω από την γραμμή του διαγράμματος.

Το έργο ενός αερίου σε μια αντιστρεπτή μεταβολή είναι αριθμητικά ίσο με το εμβαδόν της επιφάνειας από την γραμμή του διαγράμματος μέχρι τον άξονα V, στο διάγραμμα pV.

4-6 ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

Αν έρθουν σε επαφή δύο σώματα με διαφορετικές θερμοκρασίες T_1 και T_2 ($T_1 > T_2$), μετά από κάποιο

χρόνο θα αποκτήσουν ίδια θερμοκρασία T , μεταξύ των θερμοκρασιών T_1 και T_2 ($T_1 > T > T_2$). Φαίνεται σαν κάτι να μεταφέρεται από το θερμότερο προς το ψυχρότερο σώμα. Αυτό που μεταφέρεται είναι ενέργεια.

Η ενέργεια που μεταφέρεται λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας δύο σωμάτων ονομάζεται θερμότητα και συμβολίζεται με Q .

Η θερμότητα, ως μορφή ενέργειας, στο SI μετριέται σε Joule. Πιο συνηθισμένη μονάδα της είναι η θερμίδα (cal από το calorie). $1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$.

Προσοχή: Η θερμότητα δεν πρέπει να συγχέεται με τη θερμοκρασία. Η θερμότητα είναι ενέργεια ενώ η θερμοκρασία είναι το μέγεθος που επινοήσαμε για να μετράμε αντικειμενικά πόσο ζεστό ή κρύο είναι ένα σώμα.

4-7 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Ένα αέριο σε υψηλή πίεση έχει τη δυνατότητα να παράγει έργο, επομένως το αέριο εμπεριέχει ενέργεια. Την ενέργεια αυτή θα την ονομάσουμε **εσωτερική ενέργεια** (συμβολίζεται με U), για να τη διακρίνουμε από οποιαδήποτε εξωτερική ενέργεια μπορεί να έχει το αέριο (π.χ. το αέριο μπορεί να έχει και κινητική ενέργεια λόγω μεταφορικής κίνησης που εκτελεί το δοχείο μέσα στο οποίο βρίσκεται).

Από μικροσκοπική άποψη, η ενέργεια που εμπεριέχει ένα σύστημα οφείλεται στην ενέργεια που έχουν τα σωματίδια που το απαρτίζουν. Τα μόρια, τα άτομα ή τα ιόντα οποιουδήποτε σώματος, σε όποια φάση και αν βρίσκεται (στερεή, υγρή ή αέρια) διαρκώς κινούνται. Έχουν επομένως κινητική ενέργεια. Επιπλέον, στα στερεά και στα υγρά τα σωματίδια αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, επομένως έχουν και δυναμική ενέργεια.

Κάθε σώμα εμπεριέχει ενέργεια, που είναι το άθροισμα των ενεργειών των σωματιδίων που το απαρτίζουν, ως αποτέλεσμα της σχετικής τους κίνησης ως προς το κέντρο μάζας του σώματος και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους. Αυτή την ενέργεια την ονομάζουμε εσωτερική ενέργεια.

Η εσωτερική ενέργεια ιδανικού αερίου

Τα μόρια του ιδανικού αερίου δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, επομένως δεν έχουν δυναμική ενέργεια. Η εσωτερική ενέργεια ενός ιδανικού αερίου οφείλεται στις κινητικές ενέργειες που έχουν τα μόριά του και είναι ίση με το άθροισμα αυτών των ενεργειών.

Η εσωτερική ενέργεια ενός ιδανικού αερίου είναι δυνατό να υπολογιστεί.

Η μέση κινητική ενέργεια ενός μορίου ιδανικού αερίου υπολογίστηκε στην παράγραφο 15 και βρέθηκε

$$\frac{1}{2}m\overline{u^2} = \frac{3}{2}kT.$$

Αν το αέριο περιέχει N μόρια, η εσωτερική του ενέργεια θα είναι

$$U = N \frac{1}{2}m\overline{u^2} = N \frac{3}{2}kT \quad (4.4)$$

Αλλά $N = nN_A$ όπου n ο αριθμός των mol του αερίου.

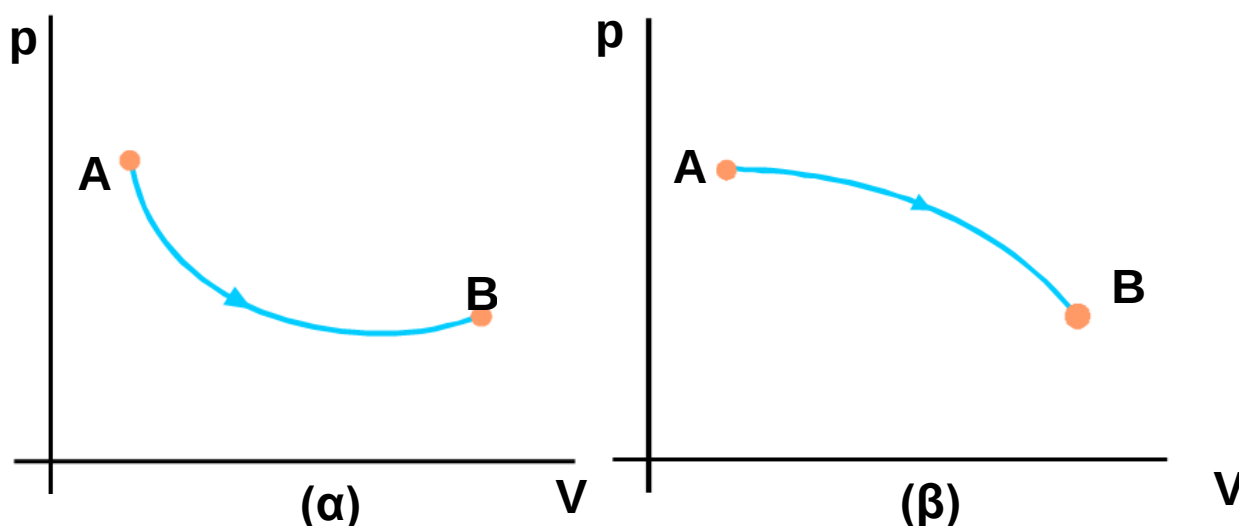
Επομένως $U = nN_A \frac{3}{2}kT$ και, αν λάβουμε υπόψη ότι

$N_A k = R$, τελικά

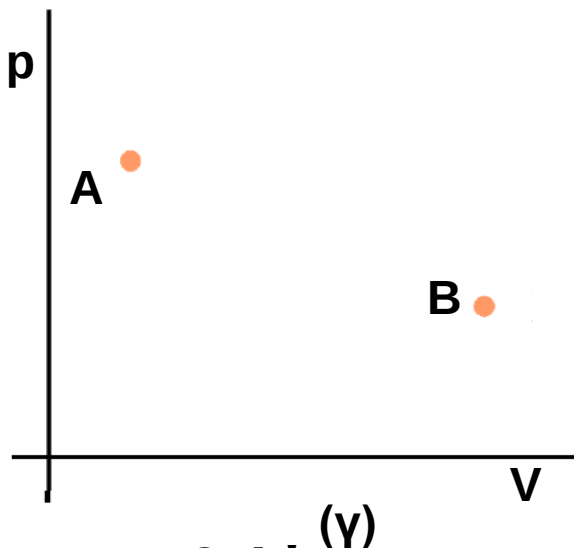
$$U = \frac{3}{2}nRT \quad (4.5)$$

Η (4.5) δείχνει ότι η εσωτερική ενέργεια ορισμένης ποσότητας ιδανικού αερίου εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του.

Έστω ένα ιδανικό αέριο που βρίσκεται αρχικά σε ισορροπία στην κατάσταση A. Αν το αέριο μεταβεί σε μια άλλη κατάσταση ισορροπίας B, η εσωτερική του ενέργεια θα μεταβληθεί. Σύμφωνα με τη σχέση (4.5) η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του αερίου εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική θερμοκρασία και όχι από τον τρόπο που πραγματοποιήθηκε η μεταβολή. Γενικότερα η μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια ενός θερμοδυναμικού συστήματος εξαρτάται μόνο από την αρχική και την τελική κατάσταση του συστήματος.



Σχ. 4.8 Στα (α) και (β) ένα αέριο σύστημα μεταβαίνει από την κατάσταση A στη B με, διαφορετικό κάθε φορά, αντιστρεπτό τρόπο.



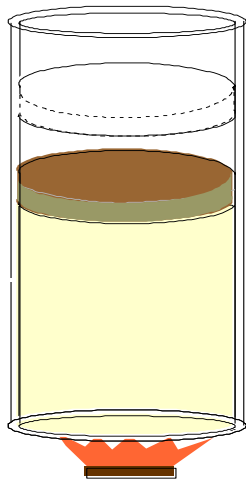
Στο (γ) το ίδιο σύστημα μεταβαίνει από την κατάσταση A στη B με μη αντιστρεπτό τρόπο. Η μεταβολή δεν μπορεί να παρασταθεί γραφικά. Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του συστήματος είναι ίδια σε όλες τις περιπτώσεις.

Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας ενός θερμοδυναμικού συστήματος εξαρτάται μόνο από την αρχική και την τελική κατάσταση του συστήματος και όχι από τον τρόπο που πραγματοποιήθηκε η μεταβολή.

4-8 ΠΡΩΤΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

Ένα αέριο μεταβαίνει από μια αρχική κατάσταση σε μια άλλη. Έστω ότι κατά τη διάρκεια αυτής της μεταβολής το αέριο απορρόφησε ποσό θερμότητας Q και ότι το έργο που παράγει το αέριο κατά τη μεταβολή αυτή είναι W .

Η θερμότητα που προσφέρθηκε στο αέριο μετασχηματίζεται σε ενέργεια άλλης μορφής. Συγκεκριμένα, ένα μέρος της μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξήσει την εσωτερική ενέργεια του αερίου και το υπόλοιπο μετατρέπεται σε μηχανικό έργο.



Σχ. 4.9 Ποσότητα αέριου θερμαίνεται. Το αέριο κατά την διάρκεια της μεταβολής του παράγει έργο.

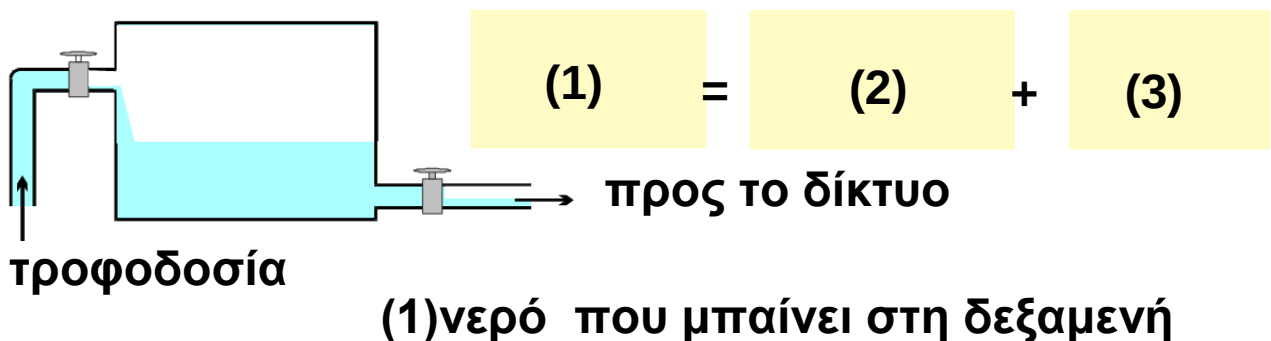
Το ποσό της θερμότητας που προσφέρεται στο αέριο, η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του αερίου και το έργο που παράγει το αέριο συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση

$$Q = \Delta U + W \quad (4.6)$$

Η σχέση (4.6) αποτελεί τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο.

Το ποσό θερμότητας (Q) που απορροφά ή αποβάλλει ένα θερμοδυναμικό σύστημα είναι ίσο με το αλγεβρικό άθροισμα της μεταβολής της εσωτερικής του ενέργειας και του έργου που παράγει ή δαπανά το σύστημα.

Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος είναι η εφαρμογή της αρχής διατήρησης της ενέργειας στη θερμοδυναμική. Το παράδειγμα που ακολουθεί αποτελεί ένα μηχανικό ισοδύναμο του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου



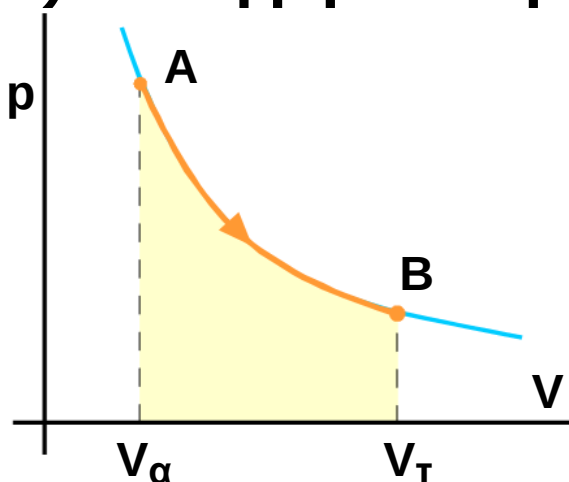
- (2)μεταβολή στην ποσότητα νερού της δεξαμενής
(3)νερό που έφυγε προς το δίκτυο

Σχ. 4.10 Η δεξαμενή τροφοδοτείται από κάποια πηγή και δίνει νερό σε δίκτυο, μέσω αγωγού. Η δεξαμενή παίζει το ρόλο του θερμοδυναμικού συστήματος. Το νερό μέσα στη δεξαμενή αντιστοιχεί στην εσωτερική ενέργεια, το νερό που εισέρχεται στη θερμότητα και το νερό που εξέρχεται στο μηχανικό έργο.

Αν το σύστημα απορροφά θερμότητα, το Q στην σχέση (4.6) είναι θετικό, αν αποβάλλει θερμότητα είναι αρνητικό. Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας είναι θετική όταν αυξάνει η θερμοκρασία του συστήματος και αρνητική όταν μειώνεται. Το έργο του αερίου είναι θετικό όταν το αέριο εκτονώνεται και αρνητικό όταν συμπιέζεται.

4-9 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΥ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΝΟΜΟΥ ΣΕ ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ

Α) Ισόθερμη αντιστρεπτή μεταβολή



Σχ.4.11 Το διάγραμμα παριστάνει την ισόθερμη εκτόνωση ενός αερίου από την αρχική κατάσταση A στην τελική κατάσταση B.

Έστω μια ισόθερμη αντιστρεπτή μεταβολή ορισμένης ποσότητας αερίου από την αρχική κατάσταση A, όγκου V_{α} , στην τελική κατάσταση B, όγκου V_{τ} .

Η μεταβολή γίνεται σε σταθερή θερμοκρασία T . Το σχήμα 4.11 παριστάνει γραφικά τη μεταβολή.

Το εμβαδόν κάτω από την γραμμή του διαγράμματος είναι ίσο με το έργο που παράγει το αέριο. Από τον υπολογισμό του εμβαδού, που δεν είναι δυνατόν να γίνει χωρίς τη χρήση ολοκληρωμάτων, προκύπτει ότι

$$W = nRT \ln \frac{V_T}{V_A}$$

Επειδή η θερμοκρασία του αερίου δε μεταβάλλεται, $U_A = U_B$ επομένως $\Delta U = 0$, οπότε ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος, στην ισόθερμη μεταβολή, παίρνει τη μορφή

$$Q = W$$

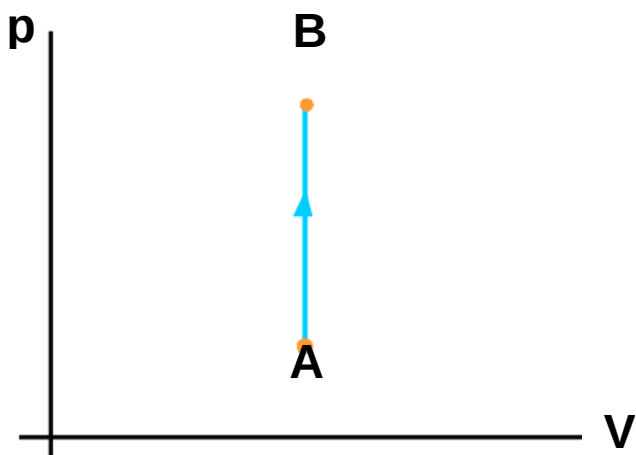
ή

$$Q = nRT \ln \frac{V_T}{V_A}$$

Στην ισόθερμη εκτόνωση όλο το ποσό θερμότητας που απορροφά το αέριο μετατρέπεται σε μηχανικό έργο.

B) Ισόχωρη αντιστρεπτή μεταβολή

Έστω η ισόχωρη αντιστρεπτή μεταβολή μιας ποσότητας αερίου, από την κατάσταση A στην κατάσταση B. Το αέριο θερμαίνεται με σταθερό όγκο και η θερμοκρασία του αυξάνεται. Το σχήμα 4.12 παριστάνει γραφικά τη μεταβολή.



Σχ. 4.12 Η ισόχωρη μεταβολή ενός αερίου από την κατάσταση A στην κατάσταση B.

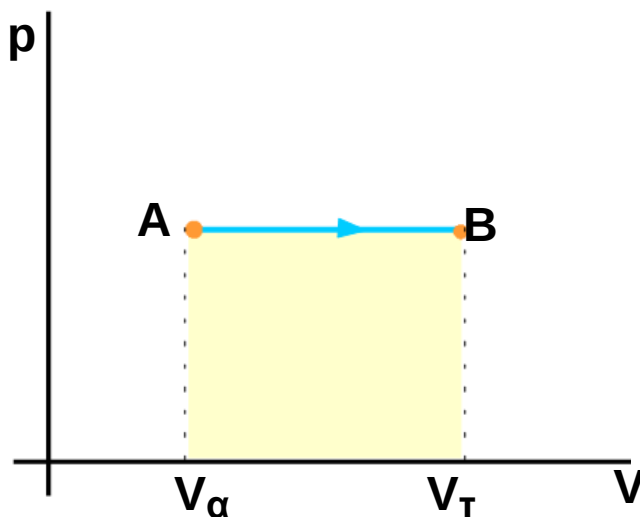
Από το σχήμα φαίνεται ότι το έργο του αερίου είναι μηδέν. Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί έργο έχουμε μόνο όταν ο όγκος του αερίου μεταβάλλεται.

Έτσι από τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο προκύπτει

$$Q = \Delta U$$

Στην ισόχωρη θέρμανση όλο το ποσό θερμότητας που απορρόφησε το αέριο χρησιμοποιήθηκε για την αύξηση της εσωτερικής του ενέργειας.

Γ) Ισοβαρής αντιστρεπτή μεταβολή



Σχ. 4.13 Η ισοβαρής μεταβολή ενός αερίου από την κατάσταση A στην κατάσταση B.

Ένα αέριο θερμαίνεται ισοβαρώς από την αρχική κατάσταση A, όγκου V_α , στην τελική κατάσταση B, όγκου V_T . Το σχήμα 4.13 παριστάνει γραφικά τη μεταβολή. Το εμβαδόν κάτω από την γραμμή του διαγράμματος δίνει το έργο του αερίου.

$$W = p \, V_T - V_\alpha \quad \text{ή} \quad W = nR \, T_T - T_\alpha$$

Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος παίρνει τη μορφή

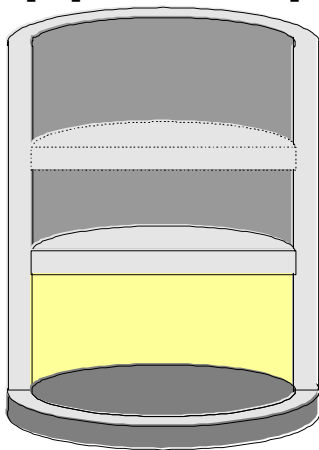
$$Q = \Delta U + p \, V_T - V_\alpha$$

Στην ισοβαρή θέρμανση ένα μέρος από το ποσό θερμότητας που απορρόφησε το αέριο από το

περιβάλλον χρησιμοποιήθηκε για την αύξηση της εσωτερικής του ενέργειας και το υπόλοιπο αποδόθηκε εκ νέου στο περιβάλλον με τη μορφή έργου.

Δ) Αδιαβατική μεταβολή

Αδιαβατική ονομάζουμε τη μεταβολή κατά την οποία δε συντελείται μεταφορά θερμότητας από το περιβάλλον προς το σύστημα ή αντίστροφα.



Σχ. 4.14 Τα τοιχώματα του δοχείου καθώς και το έμβολο είναι από μονωτικό υλικό. Στη διάρκεια της μεταβολής το αέριο δεν ανταλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον.

Έστω ένα αέριο που εκτονώνεται με αντιστρεπτό τρόπο μέσα σε δοχείο με έμβολο από την κατάσταση A (p_a, V_a) στην κατάσταση B (p_T, V_T) (σχ. 4.14). Το δοχείο και το έμβολο είναι κατασκευασμένα έτσι ώστε να μην επιτρέπουν την ανταλλαγή θερμότητας ανάμεσα στο αέριο και στο περιβάλλον (ένα τέτοιο δοχείο είναι το θερμός που χρησιμοποιούμε στα σπίτια μας). Η μεταβολή αυτή είναι μια αντιστρεπτή αδιαβατική μεταβολή.

Ο νόμος που διέπει τη μεταβολή είναι

$$pV^\gamma = \text{σταθ.}$$

[Νόμος του Poisson (Πουασόν)]

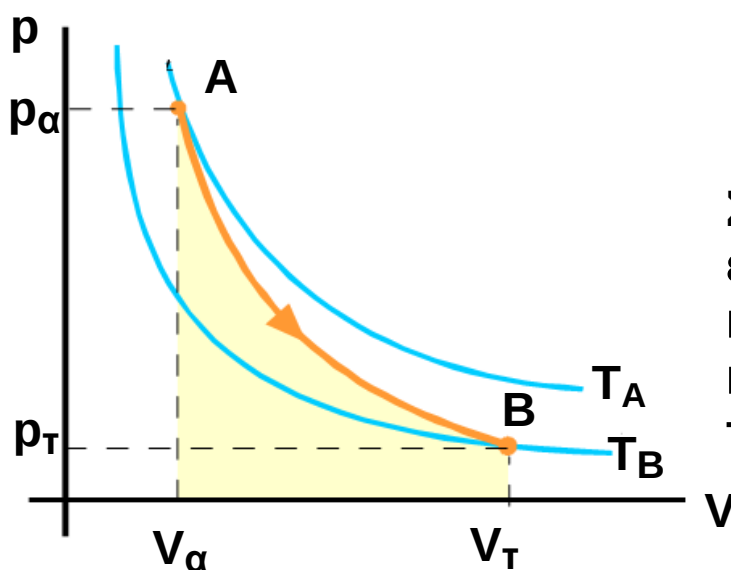
όπου γ ένας καθαρός αριθμός, μεγαλύτερος της μονάδας, που εξαρτάται από την ατομικότητα του αερίου και από το είδος των δεσμών που συγκρατούν τα άτομα στο μόριο. Για τον αριθμό αυτό θα μιλήσουμε στην επόμενη ενότητα.

Εφαρμόζοντας τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο και λαμβάνοντας υπόψη ότι $Q=0$ προκύπτει

$$0=\Delta U+W \quad \text{ή} \quad W=-\Delta U \quad (4.7)$$

Στην αδιαβατική μεταβολή το έργο είναι ίσο με το αντίθετο της μεταβολής της εσωτερικής ενέργειας.

Επειδή στη μεταβολή που περιγράψαμε το έργο είναι θετικό, από τη σχέση (4.7) προκύπτει ότι η εσωτερική ενέργεια μειώνεται, επομένως το αέριο ψύχεται.



Σχ. 4.15 Ένα αέριο εκτονώνεται αδιαβατικά από την αρχική κατάσταση A στην τελική κατάσταση B.

Το σχήμα 4.15 παριστάνει την αντιστρεπτή αδιαβατική μεταβολή που περιγράψαμε. Επειδή η τελική θερμοκρασία είναι μικρότερη από την αρχική, η καμπύλη της έχει μεγαλύτερη κλίση από την ισόθερμη που περνάει από το σημείο A. Στην αδιαβατική μεταβολή το έργο μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση

$$W=\frac{p_T V_T - p_\alpha V_\alpha}{1-\gamma}$$

Στην πράξη όταν ένα αέριο συμπιέζεται (ή εκτονώνεται) πολύ γρήγορα, πολύ μικρό ποσό θερμότητας μετακινείται από το αέριο προς το περιβάλλον ή αντίστροφα. Η διεργασία αυτή είναι σχεδόν αδιαβατική.

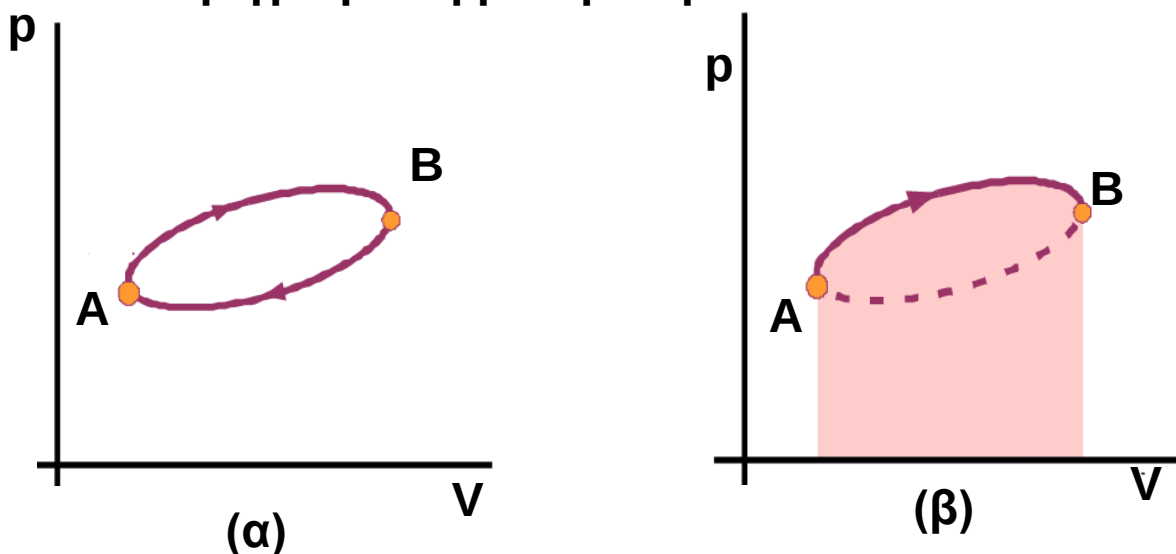
Τέτοιες διεργασίες συμβαίνουν στον κύλινδρο του βενζινοκινητήρα.

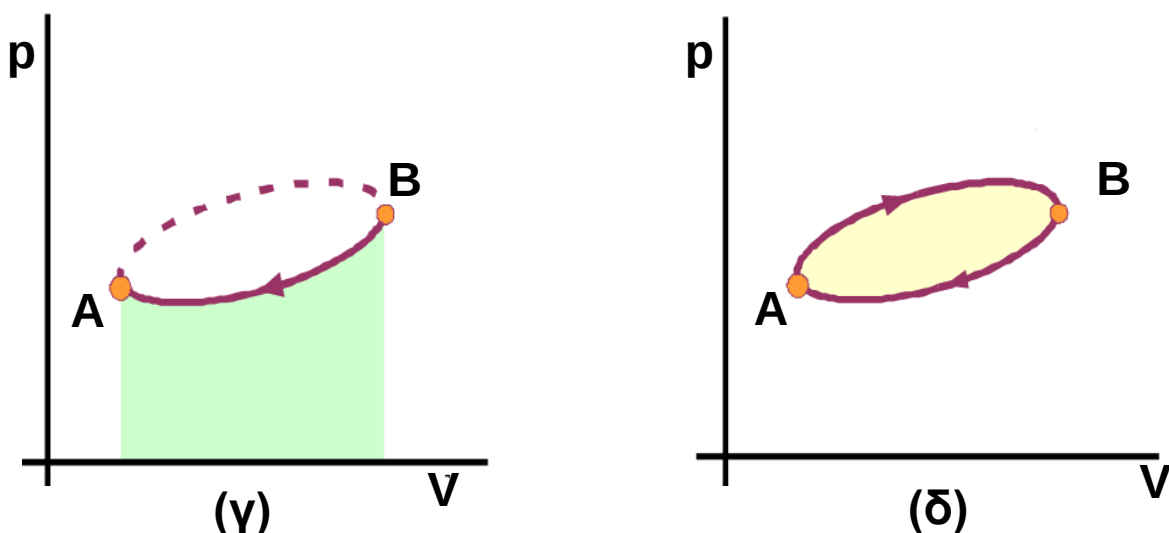
Ε) Κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή

Κυκλική ονομάζουμε μια μεταβολή στην οποία το σύστημα μετά από μια διεργασία επιστρέφει στην ίδια κατάσταση.

Το σχήμα 4.16 παριστάνει μια κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή ορισμένης ποσότητας αερίου. Το αέριο αρχικά βρισκόταν στην κατάσταση Α και μετά από μια διεργασία επιστρέφει πάλι στην αρχική κατάσταση Α.

Το έργο του αερίου μπορεί να υπολογιστεί ως εξής: Το έργο του αερίου κατά τη μεταβολή από το Α στο Β είναι ίσο με το εμβαδόν του τμήματος που είναι σκιασμένο με κόκκινο και είναι θετικό, γιατί το αέριο εκτονώνεται. Το έργο, κατά τη μεταβολή από το Β στο Α, είναι ίσο με το εμβαδόν του τμήματος που είναι σκιασμένο με πράσινο και είναι αρνητικό γιατί το αέριο συμπιέζεται. Το έργο του αερίου σε ολόκληρη την κυκλική μεταβολή που είναι το αλγεβρικό άθροισμα αυτών των έργων, είναι ίσο με το εμβαδόν που περικλείει η κλειστή γραμμή που περιγράφει τη μεταβολή.





Σχ. 4.16 Το σχήμα α παριστάνει γραφικά μια αντιστρεπτή κυκλική μεταβολή. Το εμβαδόν της χρωματισμένης επιφάνειας στο σχήμα β δίνει το έργο του αερίου κατά την μεταβολή $A \rightarrow B$. Το έργο κατά τη μεταβολή $B \rightarrow A$ είναι κατ' απόλυτη τιμή ίσο με το εμβαδόν της χρωματισμένης επιφάνειας στο σχήμα γ, η αλγεβρική του τιμή όμως είναι αρνητική. Το συνολικό έργο προκύπτει αν από το εμβαδόν του σχήματος β αφαιρέσουμε το εμβαδόν του σχήματος γ. Από την αφαίρεση αυτή προκύπτει το εμβαδόν που περικλείει η γραμμή του διαγράμματος (σχ. δ).

Το ολικό έργο σε μια κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή είναι ίσο με το εμβαδόν που περικλείεται από τη γραμμή του διαγράμματος, στη γραφική παράσταση pV .

Εάν η κυκλική μεταβολή διαγραφόταν κατά την αντίθετη φορά, για να υπολογίσουμε το έργο θα αφαιρούσαμε από το μικρό εμβαδόν το μεγάλο. Έτσι, το συνολικό έργο θα ήταν αρνητικό. Επομένως σε μια αντιστρεπτή κυκλική μεταβολή, το έργο είναι θετικό όταν η γραφική παράσταση της μεταβολής διαγράφεται με την φορά των δεικτών του ρολογιού και αρνητικό όταν διαγράφεται με την αντίθετη φορά.

Επειδή το αέριο επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση, η μεταβολή στην εσωτερική του ενέργεια είναι μηδέν $\Delta U=0$.

Εφαρμόζοντας τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο στην κυκλική μεταβολή έχουμε

$$Q=W$$

Στην κυκλική μεταβολή η θερμότητα που απορροφά ή αποδίδει το αέριο ισούται με το έργο που παράγει ή δαπανά.

4-10 ΓΡΑΜΜΟΜΟΡΙΑΚΕΣ ΕΙΔΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΕΣ ΑΕΡΙΩΝ

Έχει βρεθεί πειραματικά ότι το ποσό θερμότητας που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία ενός σώματος μάζας m , κατά ΔT δίνεται από τη σχέση

$$Q=m c \Delta T \quad (4.8)$$

όπου c είναι η ειδική θερμότητα του υλικού. Στα υγρά και στα στερεά η ειδική θερμότητα του σώματος εξαρτάται μόνο από το υλικό του.

Αν αντί για τη μάζα του σώματος χρησιμοποιήσουμε την ποσότητά του σε mol, επειδή $m=n M$, όπου M η γραμμομοριακή μάζα, μπορούμε να γράψουμε τη σχέση (4.8) με τη μορφή

$$Q=n M c \Delta T \quad (4.9)$$

Το γινόμενο $M c$ ονομάζεται γραμμομοριακή ειδική θερμότητα και συμβολίζεται με C . Αντικαθιστώντας το γινόμενο $M c$ με το C η σχέση (4.9) γίνεται

$$Q=n C \Delta T$$

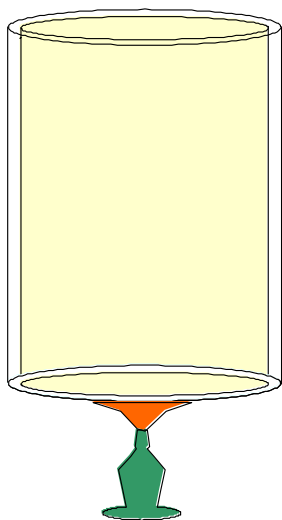
Η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα C , στο SI, μετριέται σε $J/(mol K)$ και εκφράζει το ποσό

θερμότητας που πρέπει να προσφερθεί σε 1 mol του σώματος για να αυξηθεί η θερμοκρασία του κατά ένα βαθμό.

Ενώ η ειδική θερμότητα στα υγρά και στα στερεά εξαρτάται μόνο από το υλικό, στα αέρια η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα εξαρτάται και από τον τρόπο με τον οποίο θερμαίνεται το αέριο.

Από όλους του δυνατούς τρόπους με τους οποίους μπορεί να θερμανθεί ένα αέριο, και τις αντίστοιχες γραμμομοριακές ειδικές θερμότητες που προκύπτουν, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν δύο, η θέρμανση με σταθερό όγκο και η θέρμανση με σταθερή πίεση.

Θέρμανση αερίου με σταθερό όγκο



Σχ. 4.17 Θέρμανση αερίου με σταθερό όγκο. Ο πυθμένας του δοχείου είναι διαθερμικός επιτρέπει δηλαδή τη μεταφορά θερμότητας από την εστία θέρμανσης στο αέριο.

Το αέριο του σχήματος 4.17 βρίσκεται μέσα σε δοχείο σταθερού όγκου και θερμαίνεται ώστε η θερμοκρασία του να αυξηθεί κατά ΔT . Αν συμβολίσουμε με Q_V το ποσό θερμότητας που απορροφά το αέριο και με C_V τη γραμμομοριακή ειδική θερμότητα κατά την ισόχωρη αυτή θέρμανση έχουμε

$$Q_V = nC_V\Delta T \quad (4.10)$$

Αφού ο όγκος του αερίου δε μεταβάλλεται το έργο του αερίου είναι μηδέν. Εφαρμόζοντας τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο έχουμε

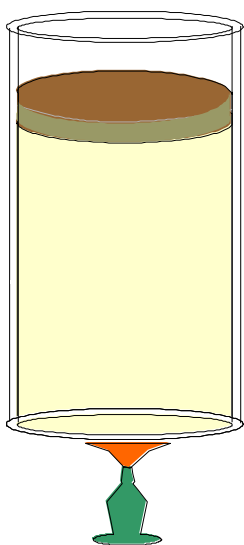
$$Q_V = \Delta U \quad (4.11)$$

Η σχέση (4.11), λόγω της (4.10), γίνεται

$$\Delta U = n C_V \Delta T \quad (4.12)$$

Πρέπει να τονιστεί ότι επειδή η εσωτερική ενέργεια ενός αερίου εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική θερμοκρασία του αερίου η σχέση (4.12) δίνει τη μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας σε κάθε περίπτωση που η θερμοκρασία ενός αερίου μεταβάλλεται κατά ΔT , με όποιον τρόπο και αν πραγματοποιείται αυτή η μεταβολή.

Θέρμανση αερίου με σταθερή πίεση



Σχ. 4.18 Θέρμανση αερίου με σταθερή πίεση.

Έστω ότι η ίδια ποσότητα αερίου θερμαίνεται ισοβαρώς (σχ. 4.18) ώστε η θερμοκρασία του να μεταβληθεί κατά το ίδιο ποσό ΔT . Αν συμβολίσουμε με Q_p και C_p τη θερμότητα και τη γραμμομοριακή ειδική θερμότητα του αερίου στην ισοβαρή θέρμανση, μπορούμε να γράψουμε

$$Q_p = n C_p \Delta T$$

Το έργο που παράγει το αέριο είναι $W=p \Delta V_1$.

Από την καταστατική εξίσωση έχουμε $p \Delta V=n R \Delta T$,
οπότε η σχέση που δίνει το έργο γίνεται

$$W=n R \Delta T \quad (4.13)$$

Από τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο $Q=\Delta U+W$, αν
λάβουμε υπόψη τις (4.12) και (4.13), προκύπτει

$$n C_p \Delta T=n C_V \Delta T+n R \Delta T$$

ή

$$C_p = C_V + R \quad (4.14)$$

Η σχέση 4.14 δείχνει ότι η C_p είναι μεγαλύτερη από τη
 C_V κατά την ποσότητα R .

Υπολογισμός των C_p και C_V

Η εσωτερική ενέργεια ιδανικού αερίου δίνεται από τη

σχέση $U=\frac{3}{2}n R T$. Όταν η θερμοκρασία του αερίου μετα-

βάλλεται κατά ΔT η εσωτερική του ενέργεια μεταβάλλε-

ται κατά $\Delta U=\frac{3}{2}n R \Delta T$. Από τη σχέση (4.12) προκύπτει

$$n C_V \Delta T=\frac{3}{2}n R \Delta T$$

άρα

$$C_V=\frac{3}{2}R=12,47 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \quad (4.15)$$

Για τη C_p ισχύει : $C_p = C_V + R = \frac{3}{2}R + R$

οπότε $C_p = \frac{5}{2}R = 20,78 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \quad (4.16)$

Η ποσότητα γ που συναντήσαμε στο νόμο της αδιαβατικής μεταβολής είναι ο λόγος των δύο γραμμομοριακών ειδικών θερμοτήτων.

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

το γ είναι καθαρός αριθμός μεγαλύτερος της μονάδας και στα ιδανικά αέρια σύμφωνα με τις σχέσεις (4.15) και (4.16) έχει την τιμή $\gamma = 5/3$.

Για τα πραγματικά αέρια η τιμή του λόγου $\frac{C_p}{C_v}$ εξαρτάται από την ατομικότητά του και το είδος των δεσμών που συγκρατούν τα άτομα στο μόριο.

Ο πίνακας που ακολουθεί δίνει τις γραμμομοριακές ειδικές θερμότητες ορισμένων αερίων όπως μετρήθηκαν πειραματικά.

Τύπος αερίου	Αέριο	C_v (J/mol·K)	C_p (J/mol·K)	$C_p C_v$ (J/mol·K)	$\gamma = C_p / C_v$
Μονοατομικό	He	12,47	20,78	8,31	1,67
	A	12,47	20,78	8,31	1,67
Διατομικό	H ₂	20,42	28,74	8,32	1,41
	N ₂	20,76	29,07	8,31	1,4
	O ₂	20,85	29,17	8,31	1,4
	CO	20,85	29,16	8,31	1,4
Πολυατομικό	CO ₂	28,46	36,94	8,48	1,3
	SO ₂	31,39	40,37	8,98	1,29
	H ₂ S	34,6	34,6	8,65	1,33

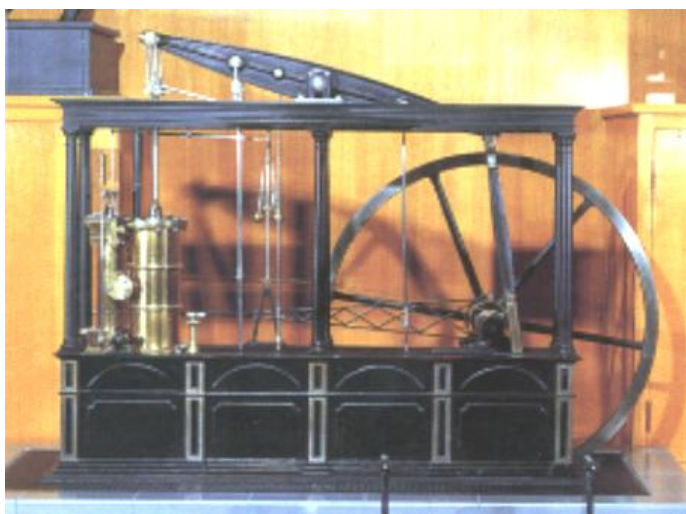
Παρατηρούμε ότι η θεωρητική πρόβλεψη για τα C_V και C_p με βάση το ιδανικό αέριο, συμφωνεί απόλυτα με τα πειραματικά δεδομένα αν πρόκειται για μονοατομικό αέριο, ενώ αποκλίνει αισθητά για τα διατομικά και πολυατομικά αέρια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ενώ τα μόρια των μονοατομικών αερίων προσεγγίζουν το μόντελο του ιδανικού αερίου τα μόρια που αποτελούνται από περισσότερα άτομα εμφανίζουν δομή που δεν γίνεται να αγνοηθεί.

Πιο συγκεκριμένα, στο ιδανικό αέριο θεωρήσαμε τα μόρια υλικά σημεία, οπότε η μόνη δυνατότητα κίνησης είναι η μεταφορική κίνηση και υπολογίσαμε την εσωτερική του ενέργεια ως το άθροισμα των μεταφορικών κινητικών ενεργειών των μορίων του. Τα διατομικά μόρια, όπως τα μόρια του N_2 και του O_2 πρέπει να θεωρηθούν ότι αποτελούνται από δύο σωματίδια συνδεδεμένα μεταξύ τους. Εκτός από τη δυνατότητα που έχει ένα τέτοιο μόριο να κάνει μεταφορική κίνηση, τα σωματίδια που το αποτελούν έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το κοινό κέντρο μάζας τους και, κάτω από ορισμένες συνθήκες (υψηλή θερμοκρασία), να ταλαντώνονται. Όλες αυτές οι κινήσεις συνεισφέρουν στην εσωτερική ενέργεια. Έτσι, αν θέλαμε να κάνουμε πιο ακριβείς υπολογισμούς όταν υπολογίζουμε την εσωτερική ενέργεια θα πρέπει για τέτοια αέρια (διατομικά -τρίατομικά) να λάβουμε υπόψη όλες τις κινήσεις. Η κινητική θεωρία ερμηνεύει τη συμπεριφορά και τέτοιων – πολυατομικών μορίων. Η μελέτη αυτή όμως ξεφεύγει από τους σκοπούς αυτού του βιβλίου. Όμως, όπως φαίνεται στον πίνακα, ακόμα και σ' αυτές τις περιπτώσεις (διατομικά ή πολυατομικά μόρια) η διαφορά $C_p C_V$ συμφωνεί, με μεγάλη προσέγγιση, με τη σχέση 4.14.

4-11 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Θερμικές μηχανές ονομάζουμε τις διατάξεις που μετατρέπουν τη θερμότητα σε μηχανικό έργο.

Η ιστορία των μηχανών αυτών αρχίζει το 1712 όταν ο Thomas Newcomen (Τόμας Νιουκάμεν) επινόησε την πρώτη ατμομηχανή. Η ατμομηχανή του Newcomen ήταν αρκετά χοντροκομμένη και χρησιμοποιήθηκε για την άντληση νερού από τα ορυχεία.



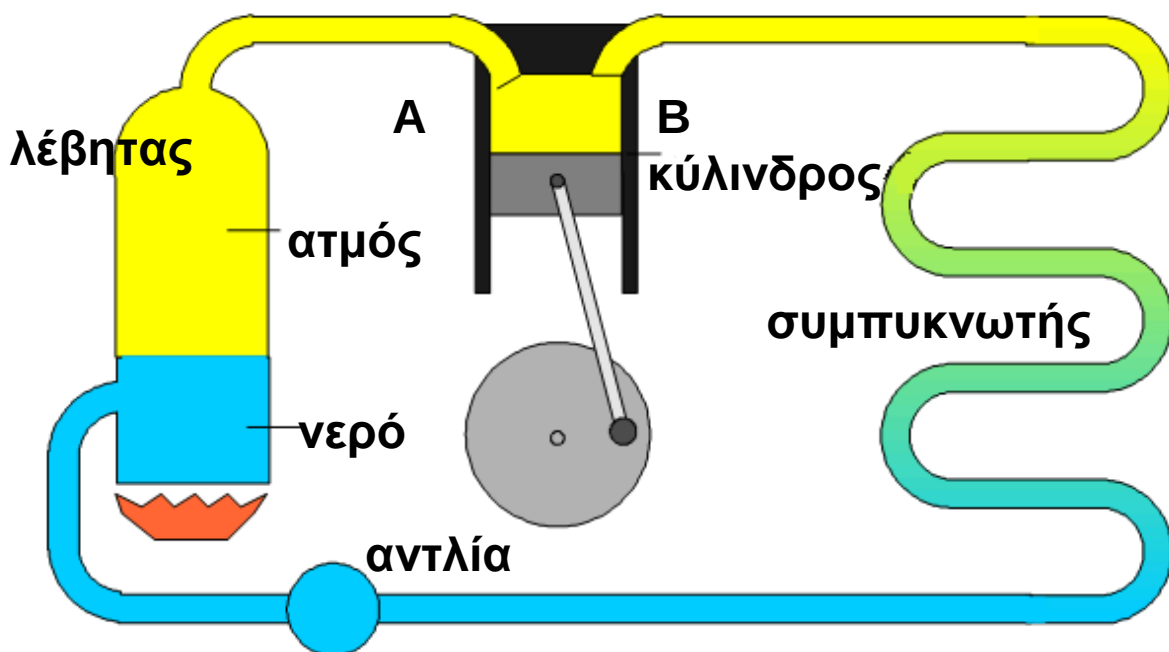
Εικ. 4.3 Η ατμομηχανή του Watt.

Το 1769 ο Watt, βελτίωσε την μηχανή του Newcomen και παρουσίασε μια μηχανή για πολλές χρήσεις. Η εφεύρεση της ατμομηχανής και στη συνέχεια η διάδοση της χρήσης της είχε ως αποτέλεσμα βαθιές αλλαγές στη ζωή των ανθρώπων και στις κοινωνικές δομές. Η περίοδος που ακολούθησε ονομάστηκε βιομηχανική επανάσταση.

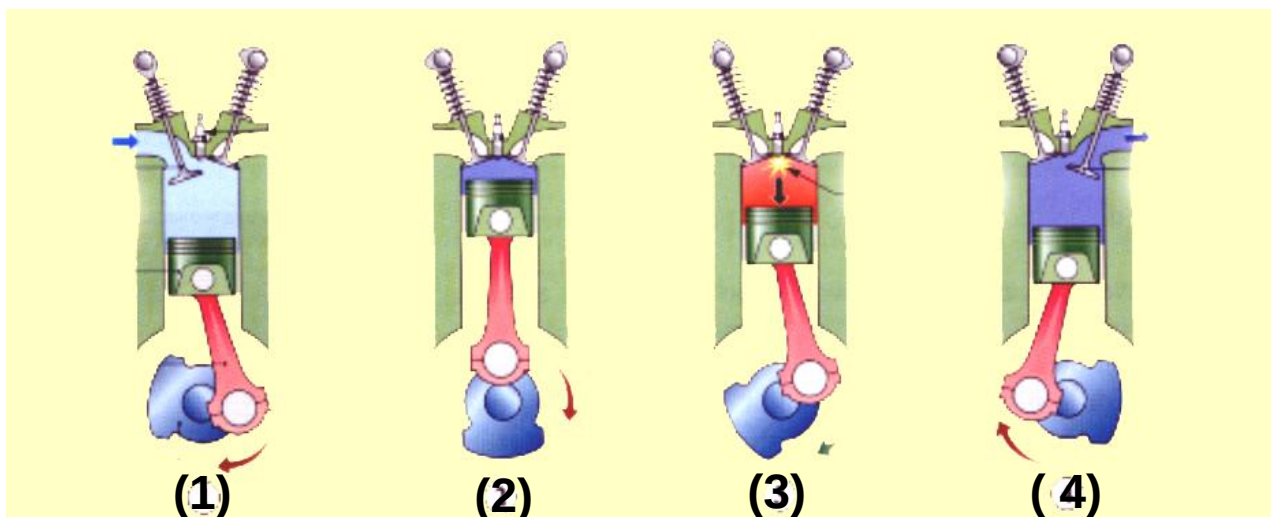
Από την εποχή του Newcomen και του Watt μέχρι σήμερα οι θερμικές μηχανές έκαναν μεγάλο δρόμο. Οι ατμομηχανές τελειοποιήθηκαν, επινοήθηκαν νέες θερμικές μηχανές, όπως οι μηχανές ντίζελ, οι βενζινοκινητήρες, οι αεροστρόβιλοι που χρησιμοποιούνται στα αεροπλάνα και οι ατμοστρόβιλοι που χρησιμοποιούνται στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που

χρησιμοποιούμε σήμερα σχετίζεται με τη χρήση των θερμικών μηχανών.

Το σχήμα 4.19 παριστάνει το μοντέλο μιας ατμομηχανής. Στο λέβητα παράγεται θερμός ατμός υψηλής πίεσης, ο οποίος μέσω της βαλβίδας A (βαλβίδα εισαγωγής) διοχετεύεται στον κύλινδρο, σπρώχνει το έμβολο και παράγει έργο. Καθώς ο ατμός εκτονώνεται μέσα στον κύλινδρο, η πίεση και η θερμοκρασία του ελαττώνονται. Στη συνέχεια ο ατμός που τώρα έχει χαμηλή πίεση αποβάλλεται από τον κύλινδρο, από τη βαλβίδα B (βαλβίδα εξαγωγής), και διοχετεύεται σε μια διάταξη που ονομάζεται συμπυκνωτής. Εκεί ο ατμός ψύχεται με τρεχούμενο νερό ή από τον αέρα και συμπυκνώνεται πάλι σε νερό. Το νερό οδηγείται πίσω στο λέβητα.



Σχ. 4.19 Αρχή λειτουργίας της ατμομηχανής.



Εικ. 4.4 Κύκλος βενζινοκινητήρα τεσσάρων χρόνων.

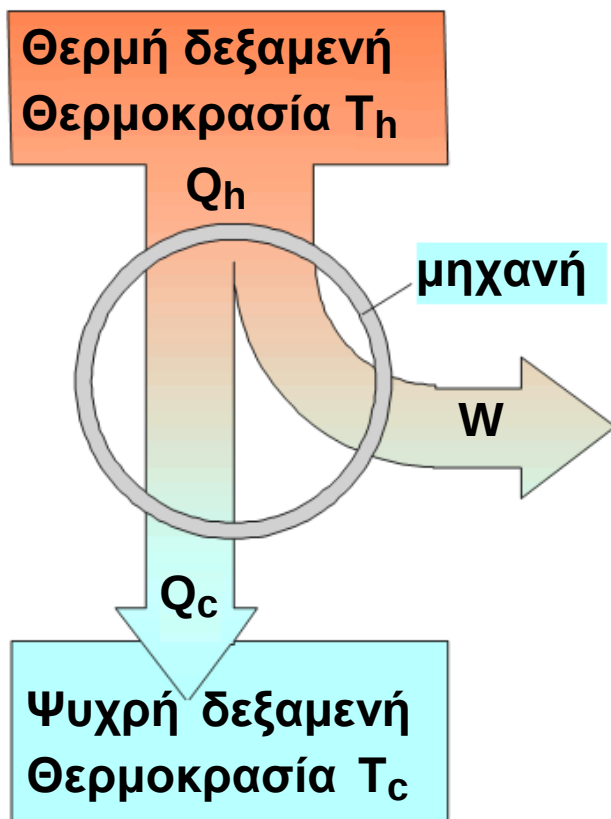
(1) Το έμβολο κατεβαίνει. Η βαλβίδα εισόδου είναι ανοικτή, μίγμα βενζίνης αέρα γεμίζει τον κύλινδρο.

(2) Το έμβολο ανεβαίνει. Οι βαλβίδες είναι κλειστές και το μίγμα συμπιέζεται

(3) Το μίγμα αναφλέγεται με το σπινθήρα που προκαλεί το μπουζί και τα αέρια της καύσης απωθούν βίαια το έμβολο προς τα κάτω

(4) Το έμβολο ανεβαίνει. Η βαλβίδα εξαγωγής είναι ανοικτή και τα καυσαέρια απομακρύνονται από τον κύλινδρο.

Στους βενζινοκινητήρες, τα θερμά αέρια που παράγονται από την καύση της βενζίνης με τον αέρα σπρώχνουν το έμβολο του κυλίνδρου και παράγουν έργο. Στη συνέχεια αποβάλλονται από τον κύλινδρο και μέσω της εξάτμισης διοχετεύονται στο περιβάλλον.



Σχ. 4.20 Αρχή λειτουργίας μιας θερμικής μηχανής. Η κυκλική περιοχή συμβολίζει τη μηχανή η οποία δέχεται ποσό θερμότητας Q_h από τη θερμή δεξαμενή, παράγει έργο W και αποβάλλει ποσό θερμότητας Q_c στην ψυχρή δεξαμενή.

Σχηματικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι η θερμική μηχανή είναι μια διάταξη που υποβάλλει ένα «μέσον» σε μια μεταβολή. Επειδή η μηχανή μετατρέπει συνεχώς τη θερμότητα σε έργο πρέπει η μεταβολή στην οποία υποβάλλεται το μέσον να είναι κυκλική, ώστε, όταν ολοκληρωθεί η μεταβολή, η μηχανή να επιστρέψει στην αρχική της κατάσταση και να επαναλάβει την ίδια διαδικασία ξανά και ξανά. Στην ατμομηχανή το υλικό που υποβάλλεται στην κυκλική διεργασία είναι το νερό. Το νερό αφού γίνει ατμός και ολοκληρώσει την πορεία του μέσω του κυλίνδρου και του συμπυκνωτή επιστρέφει στο λέβητα στις ίδιες συνθήκες.

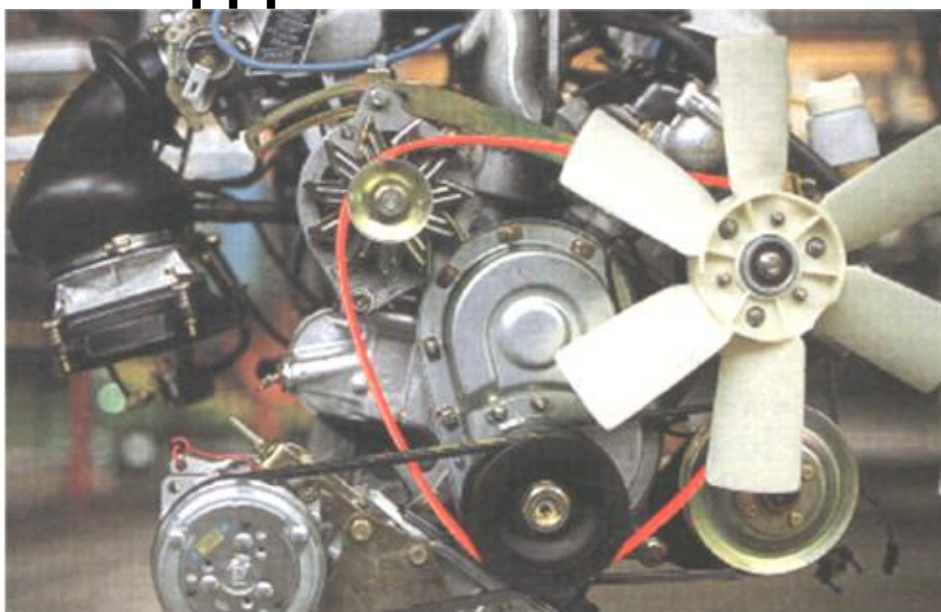
Κατά τη διάρκεια της κυκλικής μεταβολής του μέσου, η μηχανή

- 1. απορροφά θερμότητα (Q_h) από μια δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας T_h .**
- 2. παράγει έργο.**

3. αποβάλλει θερμότητα (Q_c) σε μια δεξαμενή χαμηλότερης θερμοκρασίας T_c .

Προηγουμένως χρησιμοποιήσαμε τον όρο **δεξαμενή θερμότητας**. Έτσι συνηθίζουμε να λέμε ένα σώμα που παραμένει σε σταθερή θερμοκρασία ακόμη κι αν παίρνει ή δίνει θερμότητα. Στην ατμομηχανή δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας είναι ο λέβητας, του οποίου η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή μέσω της ελεγχόμενης καύσης κάποιου καυσίμου, ενώ δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας είναι ο συμπυκνωτής, ο οποίος βρίσκεται σε επαφή ή με την ατμόσφαιρα ή με μια μάζα νερού, οπότε η θερμοκρασία του διατηρείται επίσης σταθερή. Στις μηχανές εσωτερικής καύσης το καυτό υγρό καύσιμο μέσα στο θάλαμο καύσης κύλινδρο είναι η δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας και το περιβάλλον, όπου διοχετεύονται τα καυσαέρια, η δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας.

Ο συντελεστής απόδοσης (e) οποιασδήποτε μηχανής είναι ο λόγος του ωφέλιμου έργου που μας δίνει η μηχανή προς την ενέργεια που δαπανούμε για να λειτουργήσει.



Εικ. 4.5 Βενζινοκινητήρας αυτοκινήτου.

Στη θερμική μηχανή η ενέργεια που δαπανούμε είναι η θερμότητα Q_h με την οποία τροφοδοτούμε τη μηχανή από τη δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας.

Επομένως
$$e = \frac{W}{Q_h} \quad (4.17)$$

Το καθαρό ποσό θερμότητας Q που απορροφά το μεσον είναι το ποσό θερμότητας που παίρνει από τη δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας μείον αυτό που από-βάλλει στη δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας, $Q_h - |Q_c|$.

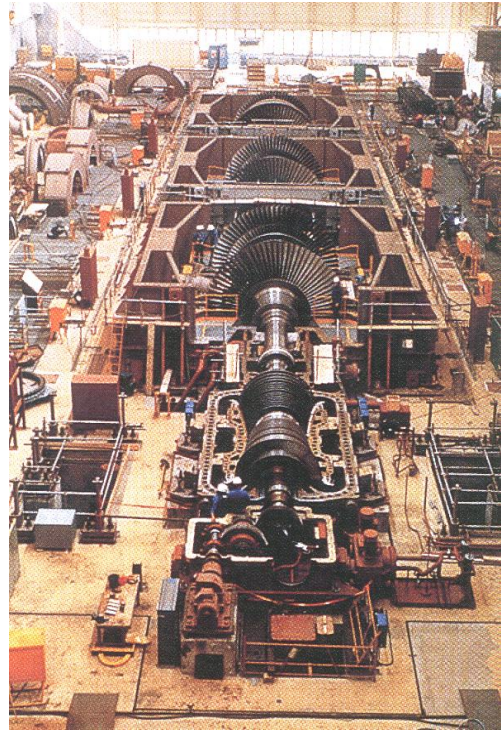
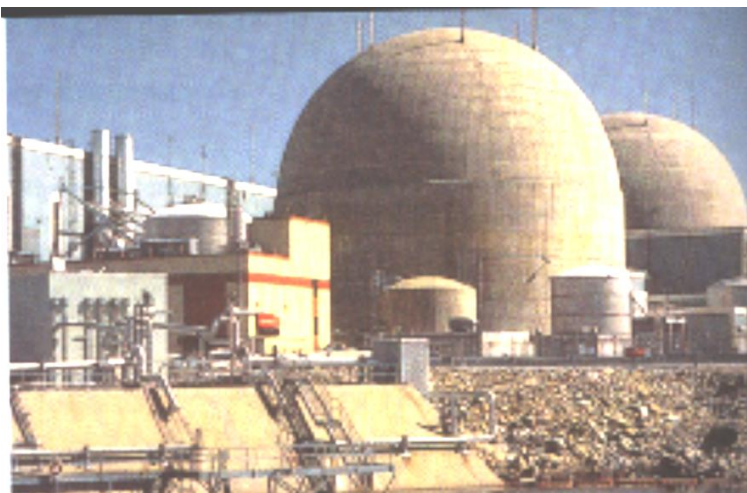
Στην κυκλική μεταβολή το έργο που παράγει το αέριο ισούται με το καθαρό ποσό θερμότητας που απορροφά δηλαδή $W = Q_h - |Q_c|$.

Αντικαθιστώντας στη (4.17) βρίσκουμε

$$e = \frac{Q_h - |Q_c|}{Q_h} \quad \text{ή} \quad e = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_h} \quad (4.18)$$

Οι ατμομηχανές έχουν απόδοση έως 18%, ενώ στις ατμομηχανές που είναι εφοδιασμένες με στρόβιλο, αντί για κύλινδρο και έμβολο, η απόδοση φτάνει μέχρι και 40%. Οι βενζινομηχανές έχουν απόδοση περίπου 20%, ενώ οι μηχανές ντίζελ από 35% έως 40%.

Εικ. 4.6 Ατμοστρόβιλος σε εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικ. 4.7 Πυρηνικό εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Βιρτζίνια των Η.Π.Α. Παράγει

ηλεκτρική ισχύ 900 MW και ταυτόχρονα αποβάλλει στο κοντινό ποτάμι θερμότητα με ρυθμό 2100 MW. Το εργοστάσιο αυτό όπως και τα υπόλοιπα του είδους του «πετάει» πολύ περισσότερη ενέργεια από όση αποδίδει σε χρήσιμη μορφή.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4.1

Μηχανή εσωτερικής καύσης καταναλώνει σε κάθε κύκλο λειτουργίας της θερμότητα 5000 J και αποβάλλει στην εξάτμιση θερμότητα 3500 J. Υπολογίστε το συντελεστή απόδοσης της μηχανής.

Απάντηση :

Ο συντελεστής απόδοσης μιας μηχανής δίνεται από την σχέση (4.18)

$$e = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_h} = 1 - \frac{3500 \text{ J}}{5000 \text{ J}} = 0,3 \text{ ή } 30\%$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4.2

Θερμική μηχανή έχει απόδοση 25%, και σε κάθε κύκλο παράγει ωφέλιμο έργο 2000 J. Υπολογίστε την ενέργεια που δαπανάται για κάθε κύκλο λειτουργίας της μηχανής.

Απάντηση :

Ο συντελεστής απόδοσης μιας μηχανής δίνεται από τη σχέση (4.17)

$$e = \frac{W}{Q_h} \quad \text{άρα} \quad Q_h = \frac{W}{e} = \frac{2000 \text{ J}}{0,25} = 8000 \text{ J}$$

Για τη λειτουργία της μηχανής δαπανάται θερμότητα 8000 J σε κάθε κύκλο.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4.3

Ο κινητήρας Diesel της εικόνας χρησιμοποιείται σε μικρά φορτηγά πλοία. Ο συντελεστής απόδοσης ενός τέτοιου κινητήρα είναι 0,25. Το πλοίο που τον φέρει ταξιδεύει με 15 κόμβους. Οι δεξαμενές του πλοίου περιέχουν 150 τόνους καυσίμου. Ποια απόσταση μπορεί να διανύσει το πλοίο με αυτά τα καύσιμα;

[1 κόμβος = 1 ναυτικό μίλι /h = 1852 m/h. 1 kg καυσίμου αποδίδει κατά την καύση του 39800 kJ].



Εικ. 4.8 Φινλανδικός κινητήρας Diesel Wartsila
12 κύλινδροι σε διάταξη V.

Εσωτερική διάμετρος κυλίνδρου : 200 mm.

Διαδρομή εμβόλου : 240 mm.

Κυλινδρισμός : 7,54 L ανά κύλινδρο.

Ισχύς : 220 kW ανά κύλινδρο για ταχύτητα 15 κόμβων.

Απάντηση :

Ο κινητήρας αποδίδει ισχύ $P=12 \times 220 \text{ kW} = 2640 \text{ kW}$

Η απόδοση του κινητήρα είναι ο λόγος της μηχανικής ισχύος (P) που αποδίδει ο κινητήρας κατά τη λειτουργία του προς την θερμική ισχύ (P_h) που παίρνει κατά την καύση του καυσίμου.

$$e = \frac{P}{P_h} \text{ οπότε } P_h = \frac{P}{e} = 10560 \text{ kW}$$

Από τα καύσιμα, σε χρονικό διάστημα $\Delta t = 1 \text{ h}$ αποδίδεται θερμότητα

$$Q_h = P_h \Delta t = 10.560 \text{ kW} \cdot 3.600 \text{ s} = 38.016.000 \text{ kJ}$$

Η μάζα του καυσίμου που αποδίδει τόση θερμότητα κατά την καύση της είναι

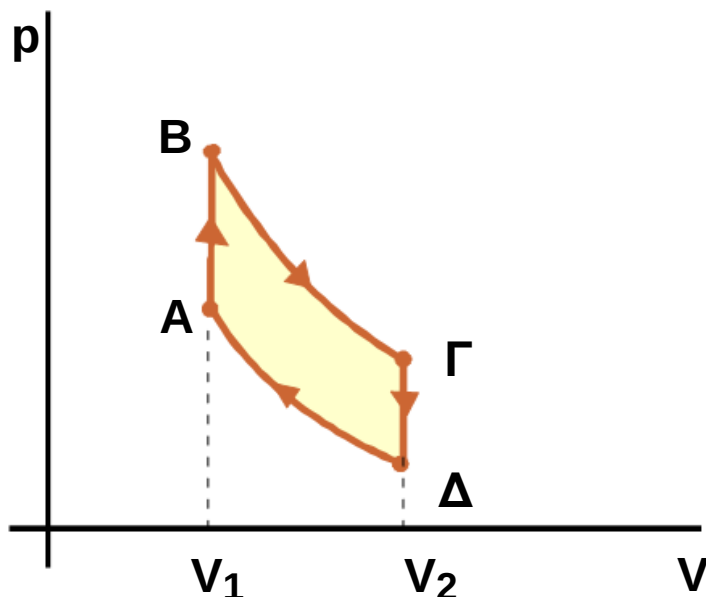
$$m = \frac{38.016.000 \text{ kJ}}{39.800 \text{ kJ/kg}} \approx 955 \text{ kg}$$

Σε μια ώρα το πλοίο διανύει $15 \text{ ν.μ./h} \times 1852 \text{ m/ν.μ.} \times 1 \text{ h} = 27780 \text{ m} = 27,78 \text{ km}$

Αφού με 955 kg καυσίμου το πλοίο διανύει 27,78 km με τους 150 τόνους θα διανύσει

$$27,78 \text{ km} \frac{150000 \text{ kg}}{955 \text{ kg}} \approx 4363 \text{ km}$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4.4



Σχ. 4.21

Κύκλος Otto (βενζινοκινητήρας)

Το ιδανικό αέριο θερμικής μηχανής εκτελεί την κυκλική μεταβολή του σχήματος 4.21 που περιλαμβάνει τις πιο κάτω διαδοχικές μεταβολές.

AB : ισόχωρη θέρμανση σε όγκο V_1 .

BΓ : αδιαβατική εκτόνωση.

ΓΔ : ισόχωρη ψύξη σε όγκο V_2 .

ΔΑ : αδιαβατική συμπίεση.

Να βρεθεί ο συντελεστής απόδοσης της μηχανής.

Απάντηση :

$$Q_{AB} = nC_V T_B - T_A$$

$$T_B > T_A \quad \text{οπότε} \quad Q_{AB} > 0$$

(απορροφάται από το σύστημα)

Η μεταβολή ΒΓ είναι αδιαβατική οπότε $Q_{BG} = 0$,

$$Q_{GD} = nC_V T_D - T_G$$

$$T_D < T_G \quad \text{οπότε} \quad Q_{GD} < 0$$

(αποδίδεται στο περιβάλλον)

Η μεταβολή ΔΑ είναι αδιαβατική
οπότε $Q_{DA} = 0$

Η θερμότητα που απορροφάται συνολικά είναι

$$Q_h = Q_{AB} = nC_V T_B - T_A$$

Η θερμότητα που αποδίδεται στο περιβάλλον είναι

$$Q_c = Q_{GD} = nC_V T_D - T_G$$

και $|Q_c| = -nC_V T_D - T_G = nC_V T_G - T_D$

$$e = \frac{W}{Q_h} = \frac{Q_h - |Q_c|}{Q_h} = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_h} = 1 - \frac{nC_V T_G - T_D}{nC_V T_B - T_A}$$

$$\text{οπότε} \quad e = 1 - \frac{T_G - T_D}{T_B - T_A} \quad (4.19)$$

Από το νόμο του Poisson για την αδιαβατική μεταβολή $B \rightarrow G$ γνωρίζουμε ότι

$$p_B V_1^\gamma = p_G V_2^\gamma \quad (4.20)$$

Από την καταστατική εξίσωση προκύπτει

$$p_B = \frac{nRT_B}{V_1} \quad \text{και} \quad p_G = \frac{nRT_G}{V_2}$$

Αντικαθιστώντας στη (4.20) τα p_B και p_Γ με τα ίσα τους προκύπτει

$$T_B V_1^{\gamma-1} = T_\Gamma V_2^{\gamma-1} \quad (4.21)$$

Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο προκύπτει επίσης

$$T_A V_1^{\gamma-1} = T_\Delta V_2^{\gamma-1} \quad (4.22)$$

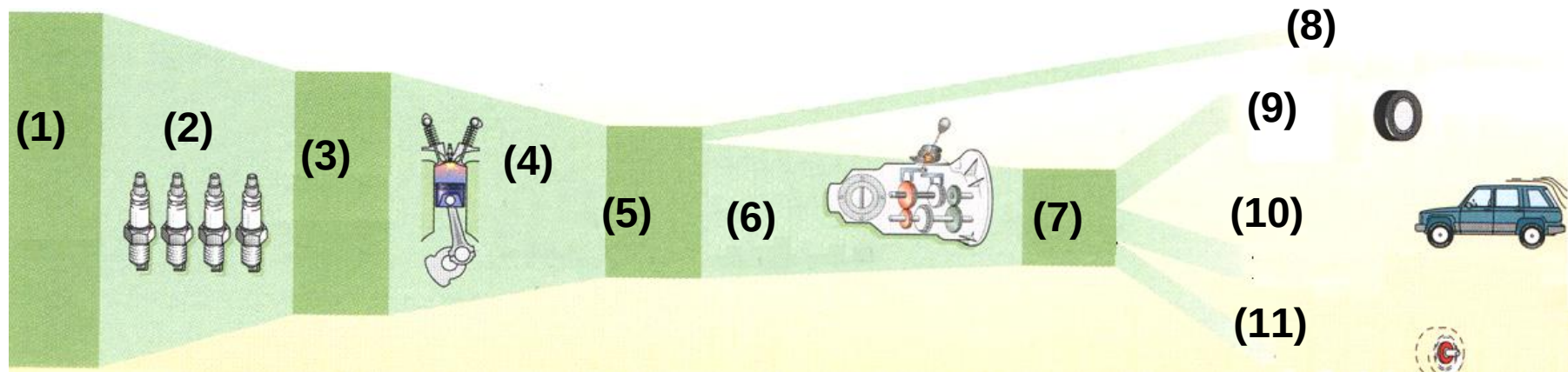
Αφαιρώντας κατά μέλη τις (4.22) και (4.21) βρίσκουμε

$$V_1^{\gamma-1} T_B - T_A = V_2^{\gamma-1} T_\Gamma - T_\Delta$$

$$\text{ή} \quad \frac{T_\Gamma - T_\Delta}{T_B - T_A} = \frac{V_1^{\gamma-1}}{V_2^{\gamma-1}}$$

και τελικά από τη (4.19) προκύπτει

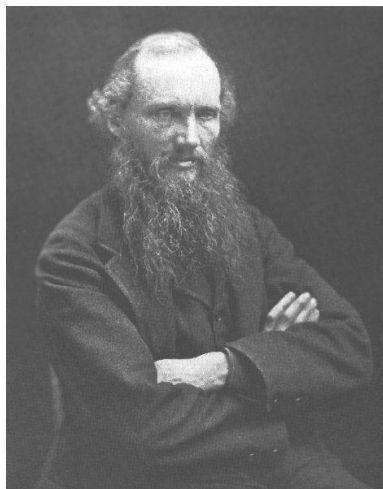
$$e = 1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}$$



- (1) 100 λίτρα
 (2) Απώλειες της καύσης
 (3) 40 λίτρα
 (4) Απώλειες του κινητήρα
 (5) 18,6 λίτρα
 (6) Απώλειες της μετάδοσης
 (7) 14,81 λίτρα
 (8) 2,2 λίτρα στα εξαρτήματα, (9) 5,21 λίτρα στα ελαστικά, (10) 4,89 λίτρα αεροδυναμική, (11) 7,71 στα φρένα

Εικ. 4.9 Όταν ένα αυτοκίνητο κινείται, μόλις το ένα έκτο της ενέργειας που παρέχεται από το καύσιμο στη μηχανή αξιοποιείται για την προώθησή του.

4-12 Ο ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ



Εικ. 4.10 Λόρδος Κέλβιν (Ουίλιαμ Τόμσον) (1825-1907). Αγγλία. Από οικογένεια εύπορη αλλά ταπεινής καταγωγής ο νεαρός Ουίλιαμ ήταν ένα παιδί θαύμα. Σε ηλικία 22 ετών κατείχε την έδρα της Φυσικής Φιλοσοφίας στο πανεπιστήμιο της Γλασκόβης. Ασχολήθηκε σχεδόν

με τα πάντα, με πολλούς κλάδους της φυσικής, με επιχειρήσεις (εγκατέστησε το πρώτο τηλεγραφικό καλώδιο μεταξύ Αμερικής Ευρώπης) και με την πολιτική (πήρε τίτλο ευγενείας και ήταν μέλος της Βουλής των Λόρδων). Μια από τις δεσπόζουσες προσωπικότητες της επιστήμης στο 19ο αιώνα, σε μια εποχή που η Αγγλία κρατούσε τα σκήπτρα της επιστημονικής πρωτοπορίας.

Η θερμοδυναμική έκανε τα πρώτα της βήματα στις αρχές του 19ου αιώνα, προσπαθώντας να δώσει λύση στα πρακτικά προβλήματα που επέβαλε η χρήση των θερμικών μηχανών. Όπως φαίνεται και από τη σχέση (4.18), ο συντελεστής απόδοσης μιας θερμικής μηχανής είναι μικρότερος από ένα. Θα ήταν ένα αν η μηχανή μετέτρεπε όλο το ποσό της θερμότητας σε ωφέλιμο έργο, ωστόσο κανένας δεν κατόρθωσε να κατασκευάσει μια τέτοια μηχανή. Όλες οι μηχανές εκμεταλλεύονται μόνο ένα μέρος της θερμότητας και αποβάλλουν σημαντικά ποσά θερμότητας στο περιβάλλον. Οι επανειλημμένες αποτυχίες των ερευνητών να κατασκευάσουν την “τέλεια” θερμική μηχανή που θα μετέτρεπε πλήρως τη θερμότητα σε ωφέλιμο έργο έπεισαν ότι η αδυναμία οφείλεται σε περιορισμούς που θέτει η ίδια η φύση. Η διαπίστωση αυτή οδήγησε στη διατύπωση του δεύτε-

ρου θερμοδυναμικού νόμου, από τους Kelvin και Planck (Κέλβιν και Πλανκ):

Είναι αδύνατο να κατασκευαστεί θερμική μηχανή που να μετατρέπει εξ ολοκλήρου τη θερμότητα σε ωφέλιμο έργο.

Μιλώντας για τη θερμότητα, είπαμε ότι, από μόνη της, μεταφέρεται πάντα από τα θερμότερα προς τα ψυχρότερα σώματα. Η αντίστροφη πορεία απαιτεί δαπάνη ενέργειας. Το ψυγείο και το κλιματιστικό είναι μηχανήματα που αναγκάζουν τη θερμότητα να μεταφερθεί από ψυχρά σώματα σε θερμότερα. Το ψυγείο, για παράδειγμα, μεταφέρει θερμότητα από τα τρόφιμα στο περιβάλλον, που είναι θερμότερο. Όμως για τη λειτουργία αυτών των μηχανών δαπανούμε ενέργεια. Δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστεί ψυγείο που να λειτουργεί χωρίς να δαπανάται ενέργεια. Αυτή η διαπίστωση οδήγησε σε μια άλλη διατύπωση του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου από τον Clausius (Κλαούζιους):

Είναι αδύνατο να κατασκευαστεί μηχανή που να μεταφέρει θερμότητα από ένα ψυχρό σώμα σε ένα θερμότερο χωρίς να δαπανάται ενέργεια για τη λειτουργία της.

Οι δύο διατυπώσεις του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου που φαινομενικά είναι εντελώς ασύνδετες, είναι ισοδύναμες. Αν αληθεύει η μία από αυτές θα αληθεύει και η άλλη.

Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος δεν θέτει περιορισμούς στις μετατροπές της ενέργειας. Σύμφωνα με το δεύτερο, όμως, η φύση θέτει περιορισμούς στη μετατροπή ενέργειας από τη μια μορφή στην άλλη. Η θερμότητα δε μπορεί να μετασχηματιστεί κατά 100% σε μηχανική ενέργεια. Επίσης ο δεύτερος θερμοδυναμικός νό-

μος, καθορίζοντας ότι η θερμότητα μεταφέρεται πάντα από τα θερμότερα προς τα ψυχρότερα σώματα, καθορίζει την κατεύθυνση προς την οποία τα φαινόμενα συμβαίνουν αυθόρμητα στη φύση.

4-13 Η ΜΗΧΑΝΗ ΤΟΥ CARNOT

Σύμφωνα με το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο, μια θερμική μηχανή δε μπορεί να έχει απόδοση 100%. Ποιος είναι όμως ο μεγαλύτερος συντελεστής απόδοσης που μπορεί να έχει μια μηχανή, όταν δίνονται οι θερμοκρασίες T_h και T_c , των δεξαμενών θερμότητας της μηχανής; Το ερώτημα αυτό απαντήθηκε το 1824 από το Γάλλο μηχανικό Carnot (Καρνό).



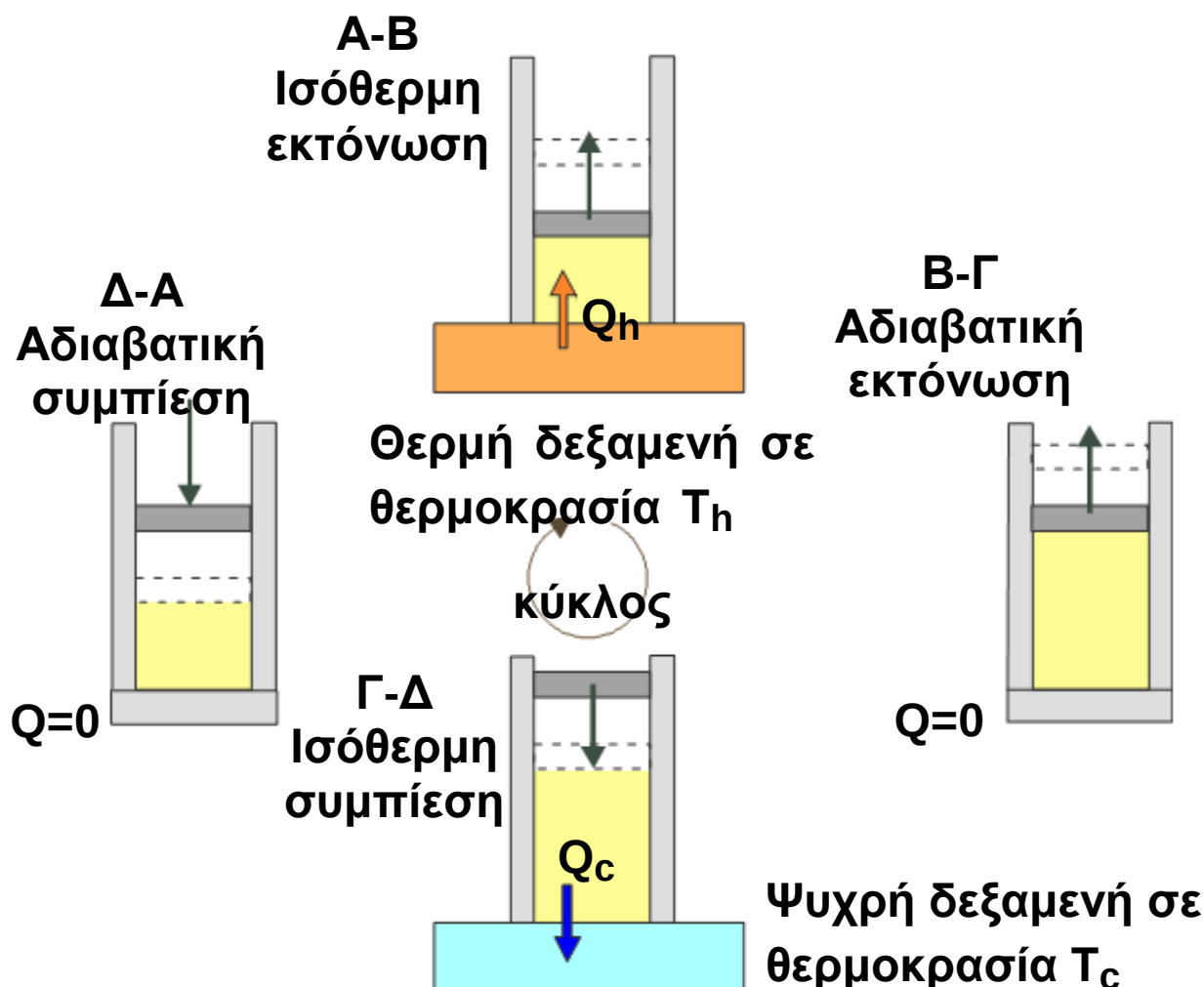
Εικ. 4.11 Σαντί Καρνό (1796-1832). Γαλλία. Στρατιωτικός και μηχανικός. Απόφοιτος της περίφημης Ecole Polytechnique που ίδρυσε ο Ναπολέων για να αντιπαρατεθεί στην ανωτερότητα των Άγγλων στις επιστήμες.

Ο Carnot περιέγραψε μια κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή, που ονομάστηκε **κύκλος Carnot**, και απέδειξε ότι μια θερμική μηχανή που θα ακολουθούσε αυτόν τον αντιστρεπτό κύκλο θα είχε τη μεγαλύτερη δυνατή απόδοση. Μια τέτοια, υποθετική, εξιδανικευμένη μηχανή ονομάζεται μηχανή Carnot και η απόδοσή της αποτελεί το ανώτερο όριο για την απόδοση όλων των άλλων μηχανών. Το συμπέρασμα αυτό είναι γνωστό ως **θεώρημα Carnot**:

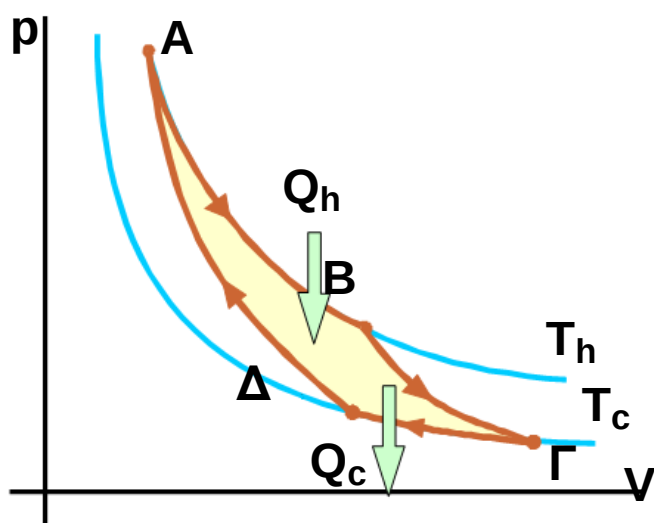
Δεν μπορεί να υπάρξει θερμική μηχανή που να έχει μεγαλύτερη απόδοση από μια μηχανή Carnot η οποία λειτουργεί ανάμεσα στις ίδιες θερμοκρασίες.

Ο κύκλος Carnot αποτελείται από τέσσερις μεταβολές, δύο ισόθερμες και δύο αδιαβατικές. Θα περιγράψουμε τον κύκλο Carnot για ιδανικό αέριο που βρίσκεται μέσα σε κύλινδρο, που φράσσεται με έμβολο.

1. Κατά τη μεταβολή $A \rightarrow B$, το αέριο βρίσκεται σε επαφή με τη θερμή δεξαμενή και εκτονώνεται ισόθερμα σε θερμοκρασία T_h , απορροφώντας θερμότητα Q_h .
2. Κατά τη μεταβολή $B \rightarrow \Gamma$, το αέριο είναι θερμικά μονωμένο και εκτονώνεται αδιαβατικά μέχρι η θερμοκρασία του να πάρει την τιμή T_c .
3. Κατά τη μεταβολή $\Gamma \rightarrow \Delta$, το αέριο βρίσκεται σε επαφή με τη δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας T_c και συμπιέζεται ισόθερμα σε θερμοκρασία T_c , αποβάλλοντας θερμότητα Q_c .
4. Κατά τη μεταβολή $\Delta \rightarrow A$, το αέριο είναι θερμικά μονωμένο και συμπιέζεται αδιαβατικά ώστε να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση.



Σχ. 4.22 Οι τέσσερις φάσεις του κύκλου Carnot. Το αέριο βρίσκεται σε δοχείο που κλείνεται με έμβολο. Το έμβολο και τα πλευρικά τοιχώματα είναι αδιαβατικά ενώ η βάση του δοχείου διαθερμική.



Σχ. 4.23 Διάγραμμα pV για τον κύκλο Carnot. Το παραγόμενο έργο W , ισούται με την θερμότητα, $Q_h - Q_c$, που απορροφά το μέσον σε ένα κύκλο.

Ο συντελεστής απόδοσης μιας θερμικής μηχανής είναι

$$e=1-\frac{|Q_c|}{Q_h} \quad (4.23)$$

Αποδεικνύεται ότι για τον κύκλο Carnot ισχύει

$$\frac{|Q_c|}{Q_h} = \frac{T_c}{T_h} \quad (4.24)$$

Αντικαθιστώντας τη (4.24) στη (4.23) βρίσκουμε ότι ο συντελεστής απόδοσης της μηχανής Carnot είναι

$$e_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad (4.25)$$

Το αποτέλεσμα δηλώνει, ότι ο συντελεστής απόδοσης μια μηχανής Carnot εξαρτάται μόνο από τις θερμοκρασίες των δύο δεξαμενών θερμότητας. Η απόδοση είναι μεγάλη όταν η διαφορά θερμοκρασίας είναι μεγάλη και είναι πολύ μικρή όταν οι θερμοκρασίες διαφέρουν λίγο. Επειδή οι περισσότερες πρακτικές εφαρμογές έχουν σαν ψυχρή δεξαμενή το περιβάλλον, δηλαδή θερμοκρασία περίπου 300 K, όσο μεγαλύτερη θερμοκρασία έχει το σώμα που "δίνει" θερμότητα τόσο πιο αποδοτική μπορεί να είναι η εκμετάλλευσή της. Επίσης το αποτέλεσμα επιβεβαιώνει το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο. Για να έχουμε απόδοση 100% πρέπει $T_c=0$, που είναι αδύνατον.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4.5

Μηχανή Carnot λειτουργεί ανάμεσα στις θερμοκρασίες $T_h=500$ K και $T_c=300$ K. Σε κάθε κύκλο αποδίδει έργο $W=2000$ J. Υπολογίστε την απόδοση της μηχανής και την ενέργεια που δαπανάται σε κάθε κύκλο.

Απάντηση :

Η απόδοση της μηχανής θα υπολογιστεί από τη σχέση (4.25)

$$e_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_c}{T_h} = \frac{2}{5} = 0,4$$

Η θερμότητα που δαπανάται για κάθε κύκλο λειτουργίας της μηχανής θα υπολογιστεί από τη σχέση (4.17)

$$e = \frac{W}{Q_h} \quad \text{άρα} \quad Q_h = \frac{W}{e} = \frac{2000\text{J}}{0,4} = 5000\text{J}$$

4-14 ΕΝΤΡΟΠΙΑ



Εικ. 4.12 Ρούντολφ Κλαούζιους (1822-1888). Γερμανία. Ένας από τους θεμελιωτές της θερμοδυναμικής.

Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος, όπως διατυπώθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, δεν καταλήγει σε κά-ποια ποσοτική σχέση.

Ποσοτική διατύπωση του 2ου θερμοδυναμικού νόμου έγινε δυνατή με την εισαγωγή μιας νέας έννοιας, της έννοιας **εντροπία** (σύμβολο S).

Η εντροπία εισήχθη από τον Clausius, ο οποίος όρισε τη μεταβολή της εντροπίας (ΔS) συστήματος κατά τη διάρκεια μιας πολύ μικρής αντιστρεπτής μεταβολής,

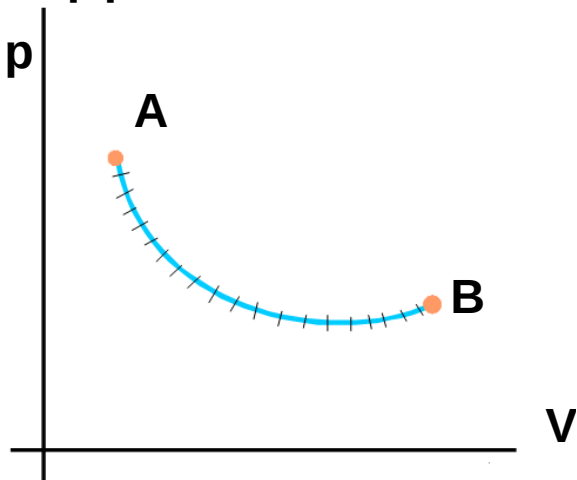
τόσο μικρής ώστε η θερμοκρασία του συστήματος να μπορεί να θεωρηθεί σταθερή, ως το πηλίκο του ποσού θερμότητας ΔQ που απορρόφησε ή απέβαλε το σύστημα προς τη θερμοκρασία του συστήματος.

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad (4.26)$$

Μονάδα της εντροπίας στο SI είναι το 1 J/K.

Όταν σε μια αντιστρεπτή μεταβολή το σύστημα απορροφά θερμότητα το ΔQ είναι θετικό, επομένως η εντροπία αυξάνεται. Όταν το σύστημα αποβάλλει θερμότητα το ΔQ είναι αρνητικό και επομένως η εντροπία μειώνεται.

Προσοχή_: η σχέση (4.26) δεν ορίζει την εντροπία αλλά μόνο τη μεταβολή της σε μια πολύ μικρή αντιστρεπτή διεργασία.



Σχ. 4.24 Σε μια αντιστρεπτή μεταβολή, η μεταβολή της εντροπίας υπολογίζεται αν χωρίσουμε τη μεταβολή σε πολύ μικρές μεταβολές και αθροίσουμε τις μεταβολές της εντροπίας σε κάθε μια από αυτές.

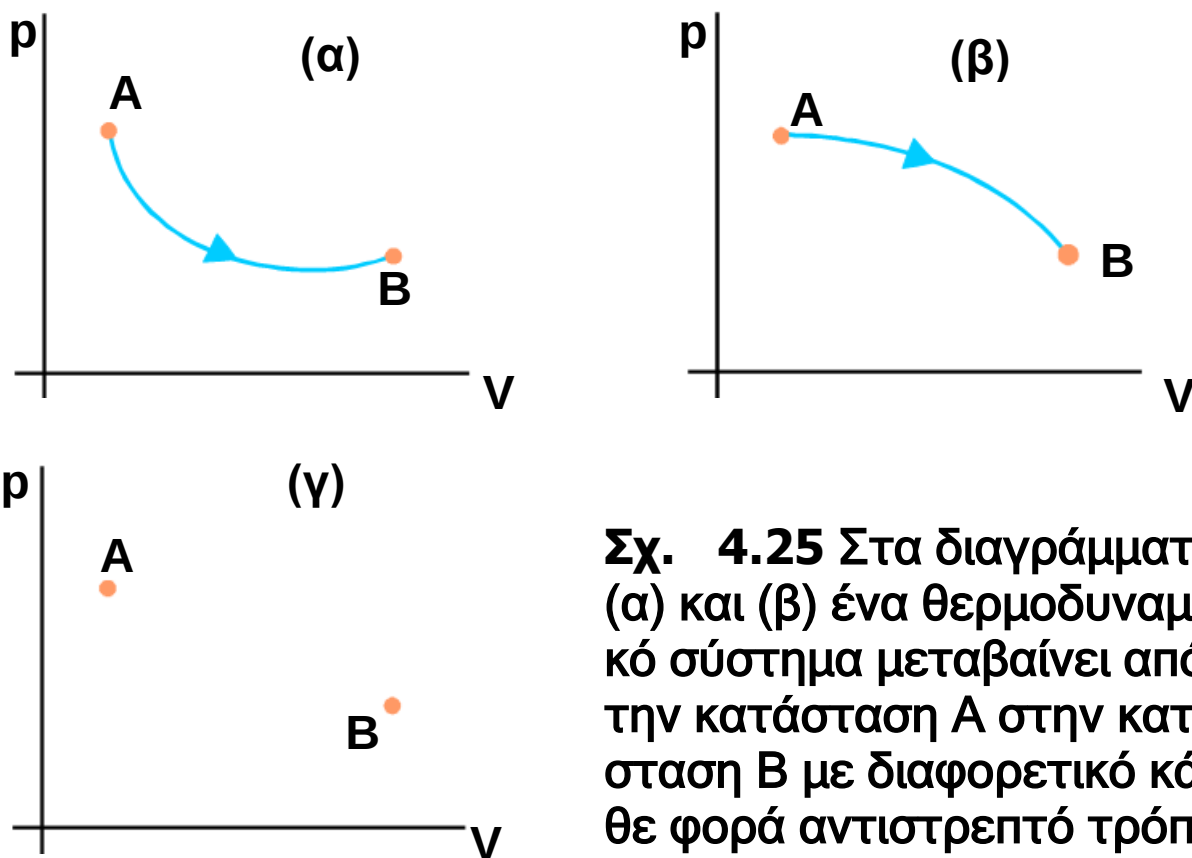
Σε μια αντιστρεπτή μεταβολή κατά την οποία ένα θερμοδυναμικό σύστημα μεταβαίνει από μία αρχική κατάσταση A σε μια τελική κατάσταση B, η συνολική μεταβολή της εντροπίας μπορεί να υπολογιστεί αν χωρίσουμε τη διεργασία σε πολύ μικρές μεταβολές (σχ. 4.24), υπολογίσουμε τη μεταβολή της εντροπίας σε κάθε μια από αυτές και αθροίσουμε όλους τους όρους.

$$S_B - S_A = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \dots + \Delta S_N =$$

$$= \frac{\Delta Q_1}{T_1} + \frac{\Delta Q_2}{T_2} + \dots + \frac{\Delta Q_v}{T_v} \quad (4.27)$$

Η μεταβολή της εντροπίας ενός συστήματος έχει την ίδια τιμή για όλες τις μεταβολές που οδηγούν από μία αρχική κατάσταση A σε μία τελική κατάσταση B, αντιστρεπτές ή μη.

Η μεταβολή της εντροπίας ενός συστήματος εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική του κατάσταση και όχι από το πώς πραγματοποιήθηκε η μεταβολή.

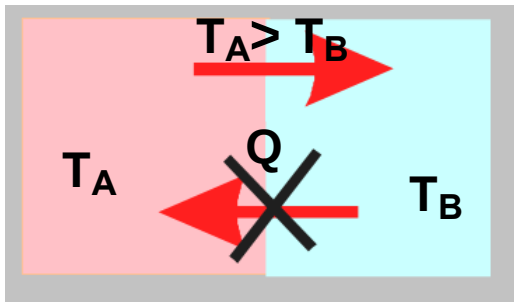


Σχ. 4.25 Στα διαγράμματα (α) και (β) ένα θερμοδυναμικό σύστημα μεταβαίνει από την κατάσταση A στην κατάσταση B με διαφορετικό κάθε φορά αντιστρεπτό τρόπο.

Στο (γ) το ίδιο σύστημα μεταβαίνει από την κατάσταση A στη B με μη αντιστρεπτό τρόπο που δεν μπορεί να παρασταθεί γραφικά. Η μεταβολή της εντροπίας του συστήματος, είναι ίδια σε όλες τις περιπτώσεις.

Ίσως βέβαια τα όσα είπαμε μέχρι τώρα να μη βοήθησαν καθόλου στο να κατανοήσετε την ανάγκη εισαγωγής αυτής της νέας έννοιας, της εντροπίας.

Ελπίζουμε όμως στη συνέχεια να πεισθείτε για την χρησιμότητα του νέου μεγέθους.



Σχ. 4.26 Η θερμότητα μεταφέρεται αυθόρμητα από σώματα υψηλότερης θερμοκρασίας προς σώματα χαμηλότερης. Το αντίστροφο αποκλείεται.

Έστω ένα σύστημα που αποτελείται από δύο σώματα το A και το B, με θερμοκρασίες T_A και T_B αντίστοιχα. Το σύστημα είναι μονωμένο από το περιβάλλον (σχ. 4.26).

Αν $T_A > T_B$, θα μετακινηθεί θερμότητα από το σώμα A στο B. Το αντίστροφο το αποκλείει ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος. Ας φανταστούμε μια αντιστρεπτή διαδικασία που μεταφέρει ένα πολύ μικρό ποσό θερμότητας ΔQ από το σώμα A στο B, τόσο μικρό ώστε να μπορούμε να λέμε ότι οι θερμοκρασίες των σωμάτων δεν μεταβλήθηκαν. Η μεταβολή της εντροπίας του

σώματος A θα είναι $\Delta S_A = -\frac{|\Delta Q|}{T_A}$, ενώ του B $\Delta S_B = \frac{|\Delta Q|}{T_B}$.

Η εντροπία του συστήματος θα μεταβληθεί, κατά

$$\Delta S = \Delta S_A + \Delta S_B = -\frac{|\Delta Q|}{T_A} + \frac{|\Delta Q|}{T_B}$$

και επειδή $T_A > T_B$ είναι $\frac{|\Delta Q|}{T_B} > \frac{|\Delta Q|}{T_A}$ επομένως $\Delta S > 0$.

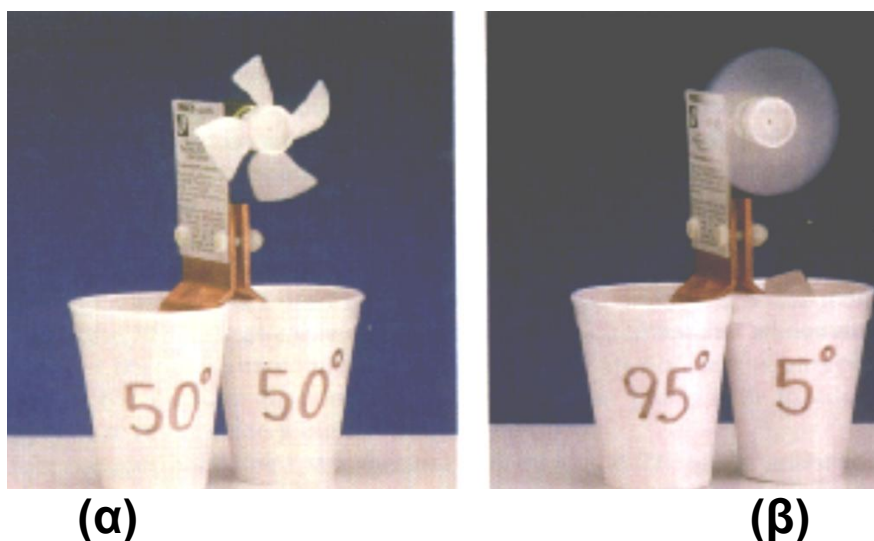
Στο υποθετικό αυτό παράδειγμα, ο δεύτερος νόμος μάς οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η εντροπία του απομονωμένου συστήματος αυξήθηκε. Το ίδιο συμβαίνει σε κάθε απομονωμένο σύστημα. Επομένως η

έννοια της εντροπίας μάς επιτρέπει να επαναδιατυπώσουμε το δεύτερο νόμο ως εξής:

Κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε μεταβολής ενός απομονωμένου συστήματος η εντροπία πάντοτε αυξάνεται.

Η εντροπία του συστήματος αποκτά τη μέγιστη τιμή της όταν επέλθει ισορροπία. Στην περίπτωση μας το σύστημα ισορροπεί όταν εξισωθούν οι θερμοκρασίες των δύο σωμάτων.

Από ενεργειακή άποψη στο σύστημα αυτό αρχικά θα μπορούσε να λειτουργήσει μια θερμική μηχανή χρησιμοποιώντας σαν δεξαμενή ψηλής θερμοκρασίας το σώμα Α και σαν δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας το σώμα Β. Η εξίσωση των θερμοκρασιών δεν παρέχει πια αυτή τη δυνατότητα.



Εικ.4.13 Τα δύο χάλκινα ελάσματα όταν βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες αναπτύσσουν μεταξύ τους διαφορά δυναμικού που επιτρέπει τη λειτουργία του ανεμιστήρα. Στην περίπτωση (α) το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία, έχει τη μέγιστη δυνατή εντροπία και δεν έχει δυνατότητα παραγωγής έργου. Στην περίπτωση (β) το σύστημα δεν βρίσκεται σε ισορροπία, η εντροπία του

είναι μικρότερη και έχει τη δυνατότητα παραγωγής έργου.

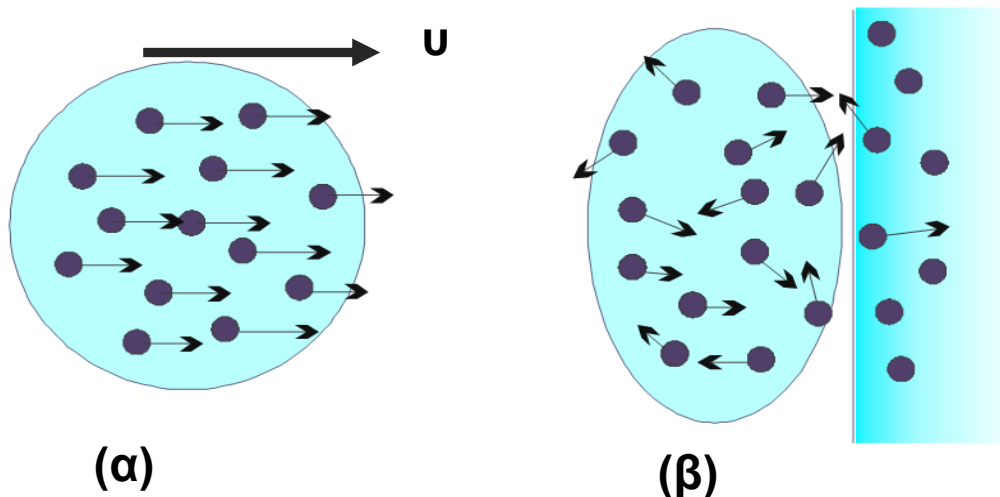
Η αύξηση της εντροπίας ενός συστήματος οδηγεί στην ελάττωση της ικανότητας του συστήματος να παράγει ωφέλιμο έργο.

Μικροσκοπική ερμηνεία της εντροπίας

Στη δεκαετία του 1870 ο Boltzmann συνέδεσε την εντροπία, έννοια μακροσκοπική, με τη μικροσκοπική δομή του συστήματος και έδωσε στην έννοια νέο περιεχόμενο. Ο Boltzmann συνέδεσε το μέγεθος εντροπία με την αταξία που επικρατεί στα δομικά στοιχεία ενός συστήματος.

Όταν μεγαλώνει η αταξία που επικρατεί σε ένα σύστημα μεγαλώνει και η εντροπία του.

Έστω ένα σώμα πολύ χαμηλής θερμοκρασίας (κοντά στο απόλυτο μηδέν), που κινείται με ταχύτητα u . Τα σωματίδια από τα οποία αποτελείται το σώμα έχουν όλα τη μεταφορική ταχύτητα u του σώματος και λόγω της πολύ χαμηλής θερμοκρασίας είναι σχεδόν ακίνητα ως προς αυτό. Η κινητική ενέργεια του σώματος είναι, σχεδόν, όση και το άθροισμα των κινητικών ενεργειών των μορίων του. Το σώμα στην πορεία του συναντά ένα εμπόδιο και συγκρούεται. Κατά τη σύγκρουση δε χάνεται ενέργεια. Αν αθροίσουμε τις κινητικές ενέργειες των μορίων του σώματος μετά τη σύγκρουση η ενέργεια που θα πάρουμε είναι όση και πριν. Για να είμαστε πιο ακριβείς, στους υπολογισμούς μας θα πρέπει να συμπεριλάβουμε και την αύξηση των κινητικών ενεργειών των μορίων του εμποδίου γύρω από το σημείο της σύγκρουσης.



Σχ. 4.27 (α) Σώμα πολύ χαμηλής θερμοκρασίας εκτελεί μεταφορική κίνηση. Όλα τα μόριά του έχουν την ίδια ταχύτητα (β) Το σώμα έχει συγκρουστεί με ακίνητο εμπόδιο. Οι ταχύτητες των μορίων έχουν τυχαίο προσανατολισμό. Η εντροπία, κατά τη σύγκρουση, αυξήθηκε.

Όμως, ενώ πριν συγκρουστεί τα μόρια του σώματος είχαν όλα την ίδια ταχύτητα (σχ. 4.27α) μετά τη σύγκρουση τα μόρια κινούνται άτακτα προς όλες τις κατευθύνσεις (σχ. 4.27β). Πριν τη σύγκρουση το σώμα είχε κάποια κινητική ενέργεια η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή έργου, λόγω χάριν θα μπορούσε να καρφώσει μια πινέζα στον τοίχο. Μετά τη σύγκρουση η συνολική ενέργεια δεν άλλαξε είναι όμως αδύνατον πια να εκμεταλλευτούμε την ενέργεια του συστήματος. Η αταξία του συστήματος αυξήθηκε, μετά τη σύγκρουση. Αν μπορούσαμε να τη μετρήσουμε θα διαπιστώναμε ότι η εντροπία αυξήθηκε.

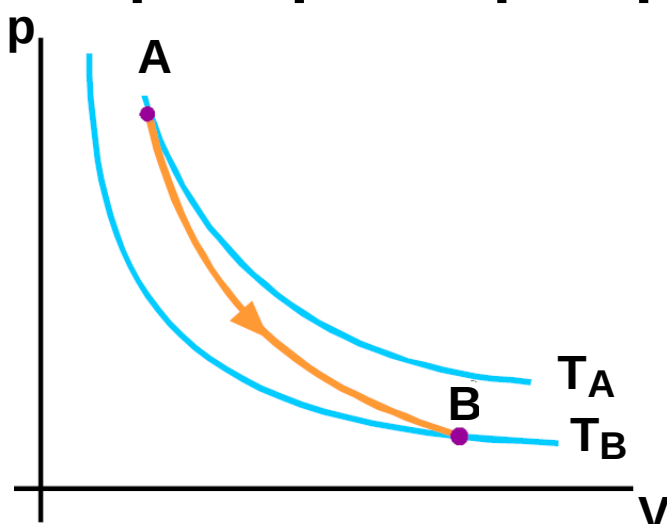
Από μακροσκοπική άποψη η αύξηση της εντροπίας οδηγεί σε μείωση της ικανότητας για παραγωγή έργου, ενώ από μικροσκοπική άποψη η αύξηση της εντροπίας οδηγεί σε αύξηση της αταξίας του συστήματος.



Εικ. 4.14 Τα Γλαρονήσια, στα βόρεια της Μήλου, έχουν προκύψει από ηφαιστειακή δράση. Η λάβα κατά την ψύξη της πήρε ασυνήθιστα γεωμετρικά, ραβδόμορφα σχήματα. Η εντροπία της λάβας μειώθηκε. Δεν γνωρίζουμε κάτω από ποιες συνθήκες συνέβη αυτό. Εκείνο για το οποίο μπορούμε να είμαστε βέβαιοι είναι το ότι καθώς μειωνόταν η εντροπία της λάβας, αυξανόταν η εντροπία του περιβάλλοντος.

4-15 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ ΣΕ ΜΕΡΙΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ

Αδιαβατική αντιστρεπτή μεταβολή



Σχ. 4.28 Ένα αέριο εκτονώνεται αδιαβατικά από την αρχική κατάσταση A στην τελική κατάσταση B. Η εντροπία του παραμένει σταθερή

Έστω ότι ένα αέριο, που βρίσκεται αρχικά στην κατάσταση A (p_A, V_A, T_A), εκτονώνεται αδιαβατικά μέχρι την

κατάσταση B (p_B, V_B, T_B). Η μεταβολή του αερίου παριστάνεται γραφικά στο σχήμα 2.28.

Επειδή πρόκειται για αντιστρεπτή μεταβολή, η μεταβολή της εντροπίας ΔS_{AB} , μπορεί να υπολογιστεί αν χωρίσουμε την διεργασία σε στοιχειώδεις μεταβολές, υπολογίσουμε την μεταβολή της εντροπίας σε κάθε στοιχειώδη μεταβολή και αθροίσουμε όλους του όρους.

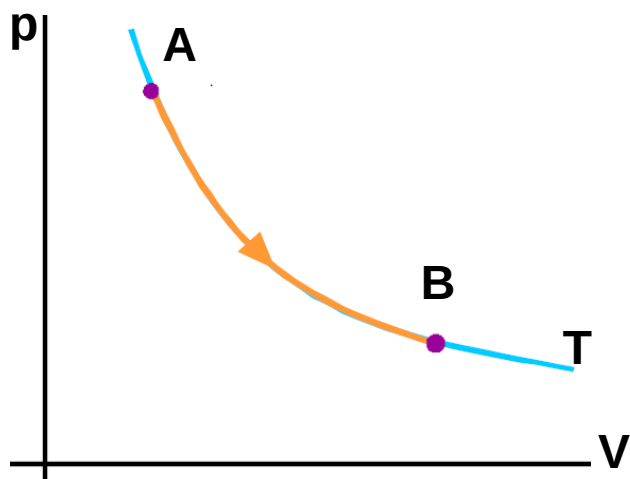
$$\Delta S_{AB} = \frac{\Delta Q_1}{T_1} + \frac{\Delta Q_2}{T_2} + \dots + \frac{\Delta Q_v}{T_v}$$

Όμως στην αδιαβατική μεταβολή το αέριο δεν ανταλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον, επομένως όλοι οι αριθμητές στο δεύτερο μέλος της παραπάνω σχέσης είναι μηδέν, με αποτέλεσμα

$$\Delta S_{AB} = 0$$

Στην αδιαβατική αντιστρεπτή μεταβολή η εντροπία δε μεταβάλλεται.

Ισόθερμη αντιστρεπτή μεταβολή



Σχ. 4.29 Το αέριο εκτονώνεται ισόθερμα από την αρχική κατάσταση A στην τελική κατάσταση B. Η εντροπία του αερίου αυξάνεται.

Έστω ένα αέριο που βρίσκεται αρχικά στην κατάσταση A και εκτονώνεται ισόθερμα σε θερμοκρασία T μέχρι την κατάσταση B. Το σχήμα 4.29 αποδίδει γραφικά τη μεταβολή του αερίου.

Και εδώ επειδή η διεργασία είναι αντιστρεπτή η μεταβολή της εντροπίας υπολογίζεται όπως πριν.

$$\Delta S_{AB} = \frac{\Delta Q_1}{T} + \frac{\Delta Q_2}{T} + \dots + \frac{\Delta Q_v}{T} =$$

$$= \frac{\Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \dots + \Delta Q_v}{T}$$

Το άθροισμα στον αριθμητή δίνει το συνολικό ποσό θερμότητας Q που απορρόφησε το αέριο κατά την μεταβολή. Έτσι, η σχέση γίνεται:

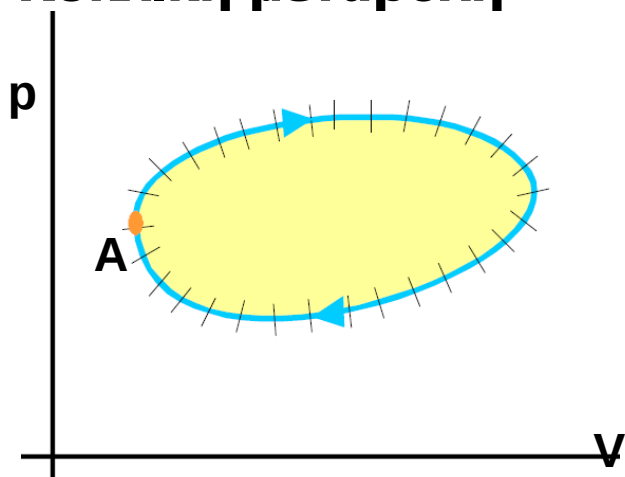
$$\Delta S_{AB} = \frac{Q}{T} \quad (4.28)$$

Στην ισόθερμη μεταβολή η θερμότητα που ανταλλάσσει το αέριο με το περιβάλλον δίνεται από τη σχέση

$$Q = nRT \ln \frac{V_B}{V_A} \text{ και επομένως}$$

$$\Delta S_{AB} = nR \ln \frac{V_B}{V_A} \quad (4.29)$$

Κυκλική μεταβολή



Σχ. 4.30 Αν χωρίσουμε την κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή σε στοιχειώδεις, τότε το άθροισμα των dS , σε όλη την κυκλική διαδρομή, είναι μηδέν.

Εφ' όσον σε μια κυκλική μεταβολή αντιστρεπτή ή όχι το σύστημα επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση, η εντροπία του συστήματος δε μεταβάλλεται.

$$\Delta S_{ολ} = 0$$

Στην περίπτωση που η κυκλική μεταβολή είναι αντιστρεπτή, αν τη χωρίσουμε σε n στοιχειώδη τμήματα, ώστε σε καθένα από αυτά να μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η θερμοκρασία είναι σταθερή, θα ισχύει :

$$\Delta S_{ολ} = \frac{\Delta Q_1}{T_1} + \frac{\Delta Q_2}{T_2} + \dots + \frac{\Delta Q_n}{T_n}$$

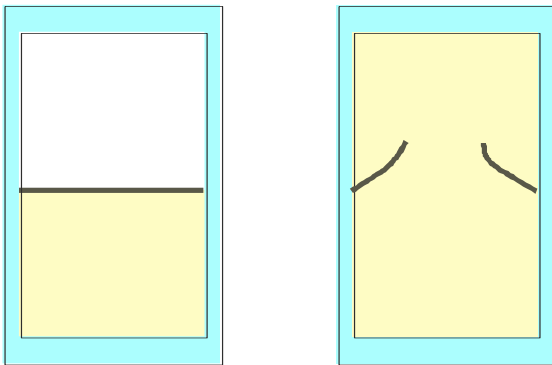
όπου $\Delta Q_1, \Delta Q_2, \dots, \Delta Q_n$ τα στοιχειώδη ποσά θερμότητας που προσλαμβάνει ή αποδίδει το σύστημα σε κάθε στοιχειώδες τμήμα της μεταβολής.

Σε μία κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή λοιπόν ισχύει και

$$\frac{\Delta Q_1}{T_1} + \frac{\Delta Q_2}{T_2} + \dots + \frac{\Delta Q_n}{T_n} = 0$$

Ελεύθερη εκτόνωση

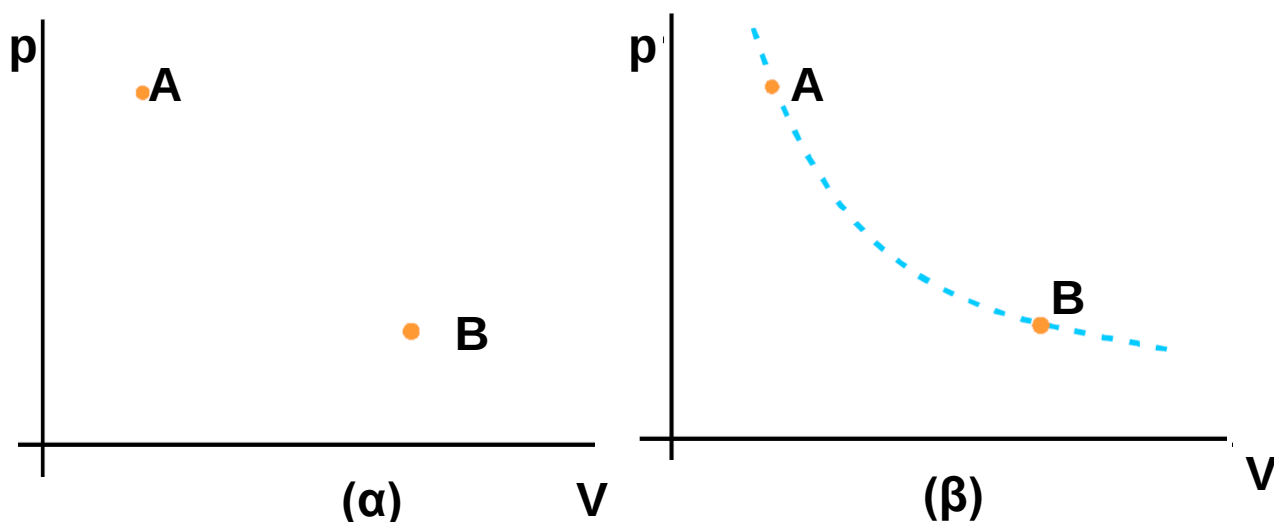
Ένα θερμικά μονωμένο δοχείο χωρίζεται με μεμβράνη σε δύο χώρους. Ο ένας περιέχει αέριο σε θερμοκρασία T και ο άλλος είναι κενός. Κάποια στιγμή η μεμβράνη σπάει και το αέριο εκτονώνεται και καταλαμβάνει αστραπιαία τον όγκο ολόκληρου του δοχείου (σχ. 4.31). Η διαδικασία εκτόνωσης είναι πολύ βίαιη και με κανένα τρόπο δε μπορεί να χαρακτηριστεί αντιστρεπτή. Θα υπολογίσουμε τη μεταβολή της εντροπίας του αερίου.



Σχ. 4.31 Ελεύθερη εκτόνωση αερίου. Όταν διαρραγεί η μεμβράνη η οποία περιορίζει το αέριο, το αέριο εκτονώνεται ελεύθερα με μη αντιστρεπτό τρόπο και καταλαμβάνει όλο τον όγκο του δοχείου.

Μη βιαστείτε να πείτε ότι, αφού το αέριο δεν ανταλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον, σύμφωνα με τη (4.26), θα είναι $\Delta S=0$. Η (4.26) ισχύει μόνο για αντιστρεπτές μεταβολές.

Αφού η μεταβολή είναι μη αντιστρεπτή δεν μπορεί να παρασταθεί γραφικά. Γραφικά μπορούν να απεικονισθούν μόνο η αρχική και τελική κατάσταση A και B του αερίου, που είναι καταστάσεις ισορροπίας (σχ. 4.32α). Το έργο που παράγει το αέριο για να καταλάβει τον κενό χώρο είναι μηδενικό και, όπως είπαμε, τα τοιχώματα του δοχείου δεν επιτρέπουν τη μεταφορά θερμότητας. Από τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο ($Q = \Delta U + W$) προκύπτει $\Delta U=0$. Η εσωτερική ενέργεια του αερίου εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική θερμοκρασία και, αφού η εσωτερική ενέργεια δε μεταβάλλεται, η τελική θερμοκρασία του αερίου είναι ίση με την αρχική T. Επειδή $T_A = T_B = T$ η αρχική κατάσταση (A) και η τελική κατάσταση (B), βρίσκονται πάνω στην ίδια ισόθερμη καμπύλη (σχ. 4.32β).



Σχ. 4.32 Η μεταβολή κατά την ελεύθερη εκτόνωση είναι μη αντιστρεπτή. Γραφικά μπορούν να παρασταθούν μόνο η αρχική και τελική κατάσταση του αερίου A και B. Επειδή κατά την ελεύθερη εκτόνωση η αρχική θερμοκρασία του αερίου είναι ίση με την τελική, η αρχική και η τελική κατάσταση του αερίου βρίσκονται πάνω στην ίδια ισόθερμη.

Για να υπολογίσουμε τη μεταβολή της εντροπίας θα εκμεταλλευτούμε το ότι αυτή εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική κατάσταση του συστήματος. Μια αντιστρεπτή διαδικασία που έχει τα ίδια άκρα A και B είναι η ισόθερμη αντιστρεπτή μεταβολή από την κατάσταση A στη B.

$$\Delta S_{AB} = \Delta S_{AB}^{\text{ισοθερμη}} = nR \ln \frac{V_B}{V_A}$$

Παρατηρούμε ότι, επειδή $V_B > V_A$, η εντροπία του αερίου αυξάνεται ($\Delta S > 0$). Το αποτέλεσμα μπορούσαμε να το προβλέψουμε, αφού στις πραγματικές (μη αντιστρεπτές) μεταβολές η εντροπία ενός απομονωμένου συστήματος αυξάνεται μέχρις ότου το σύστημα έρθει σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας.

ΣΥΝΟΨΗ

Οι ποσότητες που είναι ικανές για την περιγραφή της κατάστασης θερμοδυναμικού συστήματος, αποτελούν τις ανεξάρτητες θερμοδυναμικές μεταβλητές του συστήματος.

Μια ποσότητα αερίου βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας όταν η πίεση, η πυκνότητα, και η θερμοκρασία του, έχουν την ίδια τιμή σε όλη την έκτασή του.

Μια κατάσταση ισορροπίας παριστάνεται γραφικά με ένα σημείο.

Αντιστρεπτή ονομάζεται η μεταβολή στην οποία υπάρχει η δυνατότητα επαναφοράς του συστήματος και του περιβάλλοντος στην αρχική τους κατάσταση. Οι πραγματικές μεταβολές είναι μη αντιστρεπτές.

Η μεταβολή στην οποία το σύστημα μεταβαίνει από μια αρχική κατάσταση σε μια τελική κατάσταση μέσω διαδοχικών καταστάσεων που μπορούν να θεωρηθούν καταστάσεις ισορροπίας είναι αντιστρεπτή. Σε μια τέτοια μεταβολή μπορεί να πραγματοποιηθεί και η αντίστροφη πορεία.

Μια αντιστρεπτή μεταβολή παριστάνεται γραφικά με μια συνεχή γραμμή. Οι μη αντιστρεπτές μεταβολές δε μπορούν να παρασταθούν γραφικά.

Το έργο του αερίου για μια πολύ μικρή μεταβολή του όγκου του είναι $\Delta W = p\Delta V$. Είναι θετικό αν το αέριο εκτονώνεται και αρνητικό αν συμπιέζεται. Το έργο ενός αερίου σε μια αντιστρεπτή μεταβολή είναι ίσο με το εμβαδόν της επιφάνειας από τη γραμμή του διαγράμματος μέχρι τον άξονα V , στο διάγραμμα pV .

Θερμότητα ονομάζεται η μορφή της ενέργειας που μεταφέρεται από ένα σώμα σε ένα άλλο λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας των δύο σωμάτων.

Κάθε σώμα εμπεριέχει ενέργεια, που είναι το άθροισμα των ενεργειών των σωματιδίων που το απαρτίζουν ως αποτέλεσμα της σχετικής τους κίνησης ως προς το κέντρο μάζας του σώματος και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους. Αυτή την ενέργεια την ονομάζουμε **εσωτερική ενέργεια**.

Η εσωτερική ενέργεια ιδανικού αερίου είναι $U = \frac{3}{2}nRT$.

Η μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια ενός θερμοδυναμικού συστήματος εξαρτάται μόνο από την αρχική και την τελική κατάσταση του συστήματος.

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος : Το ποσό θερμότητας που απορροφά ή αποβάλλει ένα θερμοδυναμικό σύστημα είναι ίσο με το αλγεβρικό άθροισμα της μεταβολής της εσωτερικής του ενέργειας και του έργου που παράγει ή δαπανά το σύστημα. $Q = \Delta U + W$.

Στην ισόθερμη αντιστρεπτή μεταβολή είναι

$$W = nRT \ln \frac{V_T}{V_\alpha}$$

Στην ισόχωρη αντιστρεπτή μεταβολή $W = 0$.

Στην ισοβαρή αντιστρεπτή μεταβολή $W = p(V_T - V_\alpha)$.

Αδιαβατική ονομάζουμε εκείνη τη μεταβολή κατά την οποία δε συντελείται μεταφορά θερμότητας από το περιβάλλον προς το σύστημα ή αντίστροφα. Στην αδιαβατική μεταβολή $pV^\gamma = \text{σταθ.}$

Το έργο στην αδιαβατική αντιστρεπτή μεταβολή είναι

$$W = \frac{p_T V_T - p_\alpha V_\alpha}{1 - \gamma}$$

Κυκλική ονομάζουμε τη μεταβολή κατά την οποία το σύστημα, μετά από μια διεργασία, επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση

Το έργο σε μια κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή είναι ίσο με το εμβαδόν που ορίζεται από τη γραμμή του διαγράμματος, στο διάγραμμα pV .

Το ποσό θερμότητας που απαιτείται για να μεταβληθεί η θερμοκρασία μιας ποσότητας αερίου κατά ΔT είναι

$$Q = n C \Delta T.$$

Η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα με σταθερό όγκο και η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα με σταθερή πίεση συνδέονται με τη σχέση $C_p = C_V + R$.

Οι γραμμομοριακές ειδικές θερμότητες C_p και C_V για ένα αέριο έχουν σταθερό λόγο.

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V}$$

Η μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια ενός αερίου δίνεται από την σχέση $\Delta U = n C_V \Delta T$.

Οι θερμικές μηχανές υποβάλλουν ένα αέριο σε κυκλική μεταβολή κατά τη διάρκεια της οποίας

- 1) Η μηχανή απορροφά θερμότητα (Q_h) από μια δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας T_h
- 2) Η μηχανή παράγει έργο
- 3) Η μηχανή αποβάλλει θερμότητα (Q_c) σε μια δεξαμενή χαμηλότερης θερμοκρασίας T_c .

Η απόδοση μιας θερμικής μηχανής είναι

$$e = \frac{W}{Q_h} \quad \text{ή} \quad e = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_h}.$$

Δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος : Είναι αδύνατο να κατασκευαστεί θερμική μηχανή που να μετατρέπει εξ ολοκλήρου τη θερμότητα σε ωφέλιμο έργο ή να κατασκευαστεί μηχανή που να μεταφέρει θερμότητα από ένα ψυχρό σώμα σε ένα θερμότερο χωρίς να δαπανάται ενέργεια για τη λειτουργία της.

Ο Carnot περιέγραψε μια ιδανική κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή, που ονομάστηκε κύκλος Carnot, και απέδειξε ότι μια θερμική μηχανή που θα ακολουθούσε αυτόν τον αντιστρεπτό κύκλο θα είχε την μεγαλύτερη δυνατή απόδοση.

Η μηχανή του Carnot ακολουθεί τον εξής αντιστρεπτό κύκλο:

- 1) ισόθερμη εκτόνωση
- 2) αδιαβατική εκτόνωση
- 3) ισόθερμη συμπίεση
- 4) αδιαβατική συμπίεση.

Η απόδοση της μηχανής Carnot είναι $e_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_c}{T_h}.$

Η μεταβολή της εντροπίας κατά τη διάρκεια μιας πολύ μικρής αντιστρεπτής διεργασίας ορίζεται ως το πηλίκο του ποσού θερμότητας που απορρόφησε ή απέβαλε το σύστημα προς τη θερμοκρασία του συστήματος.

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

Η μεταβολή της εντροπίας ενός συστήματος εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική κατάστασή του.

Κατά τη διάρκεια πραγματικών μεταβολών η εντροπία ενός μονωμένου συστήματος πάντοτε αυξάνεται μέχρι να επέλθει ισορροπία, οπότε η εντροπία αποκτά τη μέγιστη τιμή της.

Η αύξηση της εντροπίας ενός συστήματος οδηγεί στην ελάττωση της ικανότητας του συστήματος να παράγει ωφέλιμο έργο.

Η εντροπία συνδέεται μικροσκοπικά με την αταξία που επικρατεί στα δομικά στοιχεία του συστήματος. Αύξηση της αταξίας συνεπάγεται αύξηση της εντροπίας του συστήματος.

Περιπτώσεις υπολογισμού μεταβολής της εντροπίας

Στην αδιαβατική αντιστρεπτή μεταβολή $\Delta S=0$

Στην ισόθερμη αντιστρεπτή μεταβολή

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \quad \text{ή} \quad \Delta S = nR \ln \frac{V_B}{V_A}.$$

Στην κυκλική μεταβολή $\Delta S_{ολ} = 0$

Στην ελεύθερη εκτόνωση $\Delta S = nR \ln \frac{V_B}{V_A}.$

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ

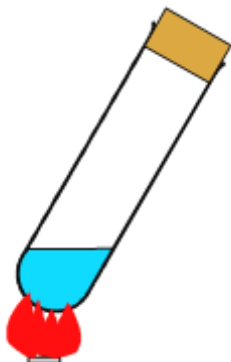
1. Θερμότητα και έργο



Σχ. 4.33

Πάρτε ένα λάστιχο (από αυτά που χρησιμοποιούμε για να κλείνουμε μικρά δέματα) και τεντώστε το μπροστά στο πάνω χείλος σας. Θα διαπιστώσετε ότι είναι λίγο θερμότερο από το περιβάλλον. Κρατήστε το έτσι για λίγο και μετά αφήστε το να ξαναπάρει το αρχικό του μήκος. Θα δείτε ότι τώρα φαίνεται λίγο πιο ψυχρό από το περιβάλλον. Πώς εξηγείται αυτό;

2. Η μετατροπή της θερμότητας σε έργο.

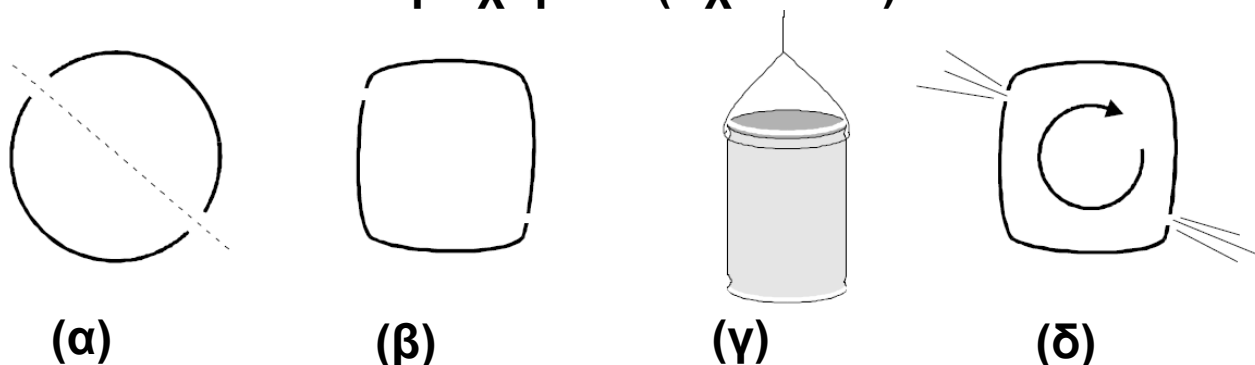


Σχ. 4.34

Σε ένα δοκιμαστικό σωλήνα ρίξτε λίγο νερό και στη συνέχεια κλείστε τον με ένα φελλό. Τοποθετήστε τον όρθιο, με το κλειστό του άκρο προς τα κάτω, στη σιγανή φωτιά ενός καμινέτου. Σε λίγο το νερό θα αρχίσει να βράζει και αν περιμένετε λίγο ο φελλός θα εκτιναχτεί. Περιγράψτε τις ενεργειακές μεταβολές που συμβαίνουν. Προσοχή : ο σωλήνας δεν πρέπει να σημαδεύει εσάς ή κάποιον άλλο.

3. Κατασκευάστε ένα ατμοστρόβιλο.

Θα χρησιμοποιήσετε ένα κλειστό μεταλλικό κουτάκι από αναψυκτικό. Χωρίς να ανοίξετε το κουτάκι ανοίξτε με ένα καρφί δύο τρύπες σε αντιδιαμετρικά σημεία της κυλινδρικής επιφάνειας, που βρίσκονται στο ίδιο ύψος και αδειάστε το περιεχόμενο (σχ. 4.35α).



Σχ. 4.35 (α) Τομή του κυλινδρικού δοχείου με τις τρύπες. (β) Τομή του δοχείου μετά την παραμόρφωση. Προσέξτε που βρίσκονται οι τρύπες. (γ) Το δοχείο κρέμεται όρθιο, δεμένο με ένα σκοινί. (δ) Ο ατμός φεύγει από τις τρύπες και το δοχείο στρέφεται.

Πιέστε με τα χέρια την κυρτή επιφάνεια ώστε το κουτί, να αποκτήσει τέσσερις γωνίες. Πρέπει να πιέσετε το κουτάκι με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε τρύπα να βρίσκεται κοντά σε κάποια γωνία (σχ. 4.35β). Βάλτε από τις τρύπες που ανοίξατε περίπου ένα δάχτυλο νερό. Δέστε το κουτάκι από το επάνω μέρος του με σκοινί ώστε να μπορεί να στρέφεται γύρω από τον άξονα του (σχ.4.35γ). Κρεμάστε το από κάπου και τοποθετήστε ακριβώς από κάτω του ένα γκαζάκι με σιγανή φωτιά. Όταν το νερό αρχίσει να βράζει, ο ατμός θα αρχίσει να φεύγει με ταχύτητα από τις τρύπες και το δοχείο να στρέφεται.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

Ισορροπία – αντιστρεπτές μεταβολές – έργο αερίου

1 Αναφέρετε δύο μη αντιστρεπτές μεταβολές, διαφορετικές από αυτές που αναφέρονται στο βιβλίο.

2 Το έργο ενός αερίου είναι όταν και αρνητικό όταν (Συμπληρώστε τα κενά).

3 Ποιες από τις επόμενες προτάσεις που αφορούν στο έργο ενός αερίου είναι σωστές;

α) Ένα αέριο παράγει έργο μόνο όταν υποβάλλεται σε αντιστρεπτή μεταβολή.

β) Αν ο όγκος του αερίου δε μεταβάλλεται, το έργο του αερίου είναι μηδέν.

γ) Σε κάθε μεταβολή, αντιστρεπτή ή όχι, το έργο ενός αερίου μπορεί να υπολογιστεί από το διάγραμμα pV .

δ) Ο υπολογισμός του έργου του αερίου από το διάγραμμα pV είναι δυνατός μόνο στην περίπτωση της μη αντιστρεπτής μεταβολής.

4 Διαθέτουμε ένα δοχείο χωρισμένο στη μέση με μεμβράνη. Στον ένα χώρο του δοχείου βρίσκεται κάποιο αέριο ενώ ο άλλος είναι κενός. Κάποια στιγμή σπάει η μεμβράνη και το αέριο καταλαμβάνει όλο το χώρο του δοχείου. Το έργο του αερίου είναι θετικό, αρνητικό ή μηδέν; Αιτιολογήστε την απάντησή σας.

Θερμότητα – Εσωτερική ενέργεια

5 Ποιες από τις επόμενες προτάσεις είναι σωστές;

α) Ένα σώμα έχει θερμότητα όταν είναι ζεστό.

β) Εάν φέρουμε σε θερμική επαφή δύο σώματα Α και Β, διαφορετικής θερμοκρασίας ($T_A > T_B$) μεταφέ-

ρεται ενέργεια (θερμότητα) από το σώμα με την υψηλότερη θερμοκρασία προς το σώμα με τη χαμηλότερη θερμοκρασία. Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της εσωτερικής ενέργειας του σώματος A και την αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του σώματος B.

γ) Με την τριβή δεν αυξάνεται η θερμότητα των σωμάτων που τρίβονται αλλά η εσωτερική τους ενέργεια.

δ) Θερμότητα και θερμοκρασία είναι διαφορετικές ονομασίες που αποδίδονται στην ίδια έννοια.

ε) Η εσωτερική ενέργεια ενός αερίου είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του.

6 Επιλέξτε τη σωστή πρόταση.

α) Η εσωτερική ενέργεια ενός αερίου είναι το άθροισμα των δυναμικών ενεργειών των μορίων του.

β) Η εσωτερική ενέργεια ενός αερίου εξαρτάται μόνο από την πίεση στην οποία βρίσκεται.

γ) Ένα θερμοδυναμικό σύστημα μπορεί να μεταβεί από μια αρχική κατάσταση σε κάποια άλλη με πολλούς τρόπους. Η μεταβολή της εσωτερικής του ενέργειας εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα μεταβαίνει από την αρχική στην τελική κατάσταση.

δ) Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας ιδανικού αερίου εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική κατάσταση.

7 Σώμα αφήνεται να ολισθήσει σε πλάγιο επίπεδο. Η εσωτερική ενέργεια του σώματος μεταβάλλεται:

α) αν μεταβληθεί η θερμοκρασία του.

- β) διότι μεταβάλλεται η ταχύτητά του.
- γ) διότι μεταβάλλεται το ύψος στο οποίο βρίσκεται το σώμα.

Επιλέξτε τη σωστή πρόταση.

8 Δύο διαφορετικές ποσότητες αερίου βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία. Ποια από τις επόμενες προτάσεις είναι σωστή;

- α) Οι δύο ποσότητες έχουν την ίδια εσωτερική ενέργεια.
- β) Μεγαλύτερη εσωτερική ενέργεια έχει η μεγαλύτερη ποσότητα.
- γ) Μεγαλύτερη εσωτερική ενέργεια έχει η ποσότητα που καταλαμβάνει το μεγαλύτερο όγκο.
- δ) Μεγαλύτερη εσωτερική ενέργεια έχει το αέριο με τη μεγαλύτερη πίεση.

Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος

9 Σύμφωνα με τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο, το ποσό θερμότητας που απορροφά ή αποβάλλει ένα θερμοδυναμικό σύστημα είναι ίσο με το αλγεβρικό άθροισμα 1) της μεταβολής του συστήματος και 2) που παράγει ή δαπανά το σύστημα. (Συμπληρώστε τις λέξεις που λείπουν).

10 Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος:

- α) Αποτελεί μια έκφραση της αρχής διατήρησης της ενέργειας.
- β) Αναφέρεται σε μονωμένα θερμοδυναμικά συστήματα.
- γ) Ισχύει μόνο στα αέρια.
- δ) Ισχύει μόνο στις αντιστρεπτές μεταβολές.

Επιλέξτε τη σωστή απάντηση.

11 Να αντιστοιχίσετε τα στοιχεία της αριστερής στήλης σε στοιχεία της δεξιάς.

**1) Ισοβαρής
αντιστρεπτή
μεταβολή**

**2) Ισόχωρη
αντιστρεπτή
μεταβολή**

**3) Ισόθερμη
αντιστρεπτή
μεταβολή**

**4) Κυκλική
αντιστρεπτή
μεταβολή**

**5) Αδιαβατική
αντιστρεπτή
μεταβολή**

α) $W=nRT\ln\frac{V_T}{V_\alpha}$

β) $W=\frac{p_\alpha+p_T}{2} \Delta V$

γ) $W=p\Delta V$

δ) $W=0$

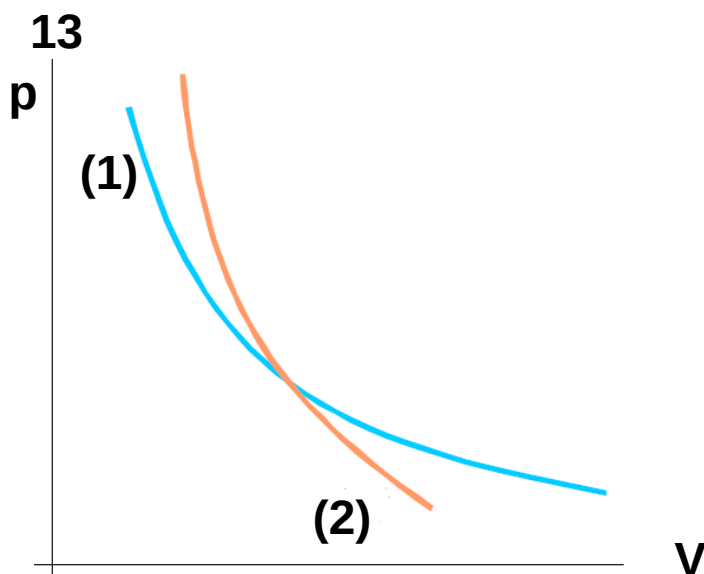
ε) $W=\frac{p_T V_T - p_\alpha V_\alpha}{1-\gamma}$

**στ) Εμβαδόν που
περικλείεται από την
κλειστή γραμμή στο
διάγραμμα $p=f(V)$**

12 Να συμπληρώσετε τα κενά:

Το έργο ενός αερίου είναι θετικό όταν το αέριο

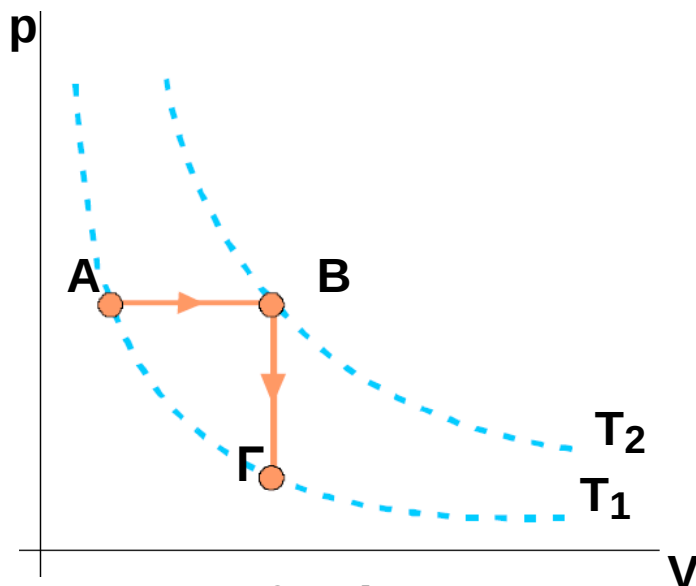
**Στην αντιστρεπτή εκτόνωση το έργο του
αερίου είναι ίσο με την ελάττωση της εσωτερικής
του ενέργειας. Στην αντιστρεπτή εκτόνωση
το έργο του αερίου είναι ίσο με τη θερμότητα που
απορροφά το αέριο.**



Σχ. 4.36

Στο διάγραμμα του σχήματος 4.36 παριστάνεται μια ισόθερμη και μια αδιαβατική μεταβολή ορισμένης ποσότητας αερίου. Ποια καμπύλη αντιστοιχεί σε κάθε μεταβολή; Δικαιολογήστε την απάντησή σας.

14 Ένα αέριο, που αρχικά βρίσκεται στην κατάσταση Α, μεταβαίνει στην κατάσταση Β με σταθερή πίεση και στη συνέχεια στην κατάσταση Γ, με σταθερό όγκο, όπως δείχνει το σχήμα 2.37.



Σχ. 4.37

1. Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του αερίου κατά τη διεργασία ΑΒ είναι:

- α) Θετική;
- β) Αρνητική;
- γ) Μηδέν;

2. Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του αερίου κατά τη διεργασία ΒΓ είναι:

- α) Θετική;
- β) Αρνητική;
- γ) Μηδέν;

3. Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του συστήματος κατά τη μετάβασή του από την κατάσταση Α στην Γ είναι:

- α) Θετική;
- β) Αρνητική;
- γ) Μηδέν;

Αιτιολογήστε τις απαντήσεις σας.

15 Επιλέξτε τη σωστή πρόταση.

α) Στην ισόθερμη εκτόνωση αερίου ένα μέρος της θερμότητας που απορροφά το αέριο μετατρέπεται σε έργο.

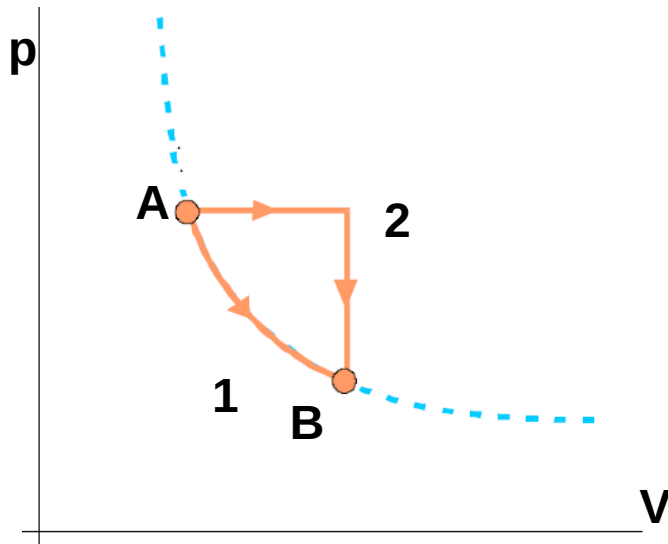
β) Στην ισοβαρή εκτόνωση, το έργο του αερίου είναι ίσο με το ποσό θερμότητας που απορροφά το αέριο.

γ) Στην ισόχωρη θέρμανση, η θερμότητα που απορροφά το αέριο είναι ίση με τη μεταβολή στην εσωτερική του ενέργεια.

δ) Στην αδιαβατική εκτόνωση το έργο του αερίου είναι ίσο με τη μεταβολή της εσωτερικής του ενέργειας.

16 Ένα αέριο, που αρχικά βρίσκεται στην κατάσταση p_A, V_A , εκτονώνεται μέχρι ο όγκος του να γίνει V_B . Να παρασταθούν σε κοινούς άξονες pV μια ισόθερμη και μια αδιαβατική που να οδηγούν από την αρχική κατάσταση στις τελικές καταστάσεις όγκου V_B . Σε ποια από τις δύο μεταβολές το έργο που παράγει το αέριο είναι μεγαλύτερο;

17. Ένα αέριο μπορεί να μεταβεί από μια αρχική κατάσταση A σε μια τελική κατάσταση B, με δύο τρόπους. α) Με μια ισόθερμη μεταβολή και β) Με μια ισοβαρή εκτόνωση και μια ισόχωρη μεταβολή. Οι δύο τρόποι παριστάνονται στο σχήμα 4.38 με τους αριθμούς 1 και 2.



Σχ.4.38

Το ποσό θερμότητας που απορροφά το αέριο είναι:

α) Μεγαλύτερο κατά τη διαδρομή 1;

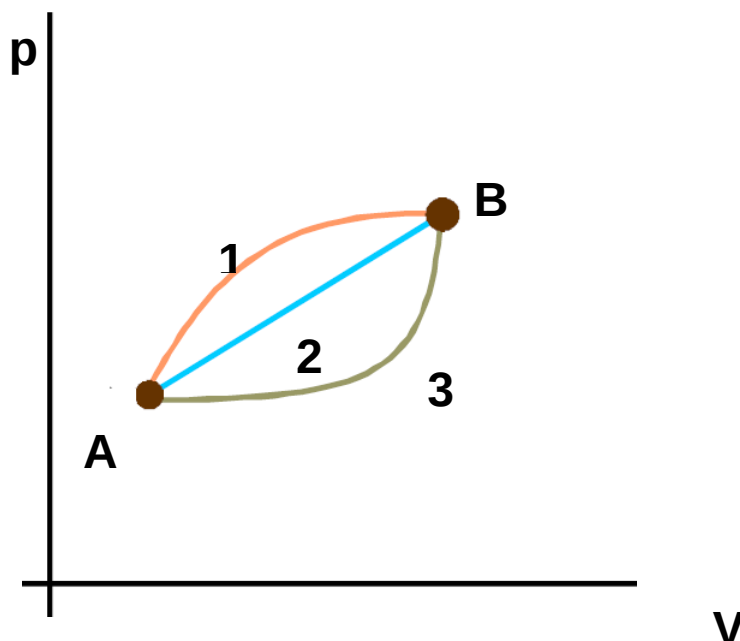
β) Ίδιο και στις δύο περιπτώσεις;

γ) Μεγαλύτερο κατά τη διαδρομή 2;

Ποια από τις προτάσεις αυτές είναι ορθή;

Αιτιολογήστε την απάντησή σας.

18



Σχ. 4.39

Ένα αέριο αρχικά βρίσκεται στην κατάσταση Α. Το αέριο μπορεί να μεταβεί στην κατάσταση Β με μία από τις μεταβολές που παριστάνονται στο διάγραμμα (σχ.4.39). Να συγκρίνετε για τις τρεις διαδρομές

- α) το έργο που παράγει το αέριο,
- β) τη μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του αερίου,
- γ) το ποσό θερμότητας που απορροφά το αέριο.

19 Ποιες από τις επόμενες προτάσεις είναι σωστές;

- α) Στην ισόχωρη μεταβολή το έργο είναι μηδέν.
- β) Στην αδιαβατική εκτόνωση η τελική θερμοκρασία είναι μικρότερη της αρχικής.
- γ) Στην αδιαβατική εκτόνωση το έργο που παράγει το αέριο είναι ίσο με την ελάττωση της εσωτερικής του ενέργειας.
- δ) Στην ισόθερμη μεταβολή η θερμότητα του ανταλλάσσει το αέριο με το περιβάλλον είναι μηδέν.
- ε) Στην κυκλική μεταβολή το έργο του αερίου είναι ίσο με το εμβαδόν που περικλείεται από τη γραμμή στο διάγραμμα pV .

Γραμμομοριακές ειδικές θερμότητες αερίων

20. Συμπληρώστε τα κενά:

Η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα εκφράζει το ποσό θερμότητας που πρέπει να προσφερθεί σε ένα mol αερίου ώστε να ανέβει η θερμοκρασία του κατά

Στα αέρια, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο και η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα

..... Η σχέση που συνδέει τις δύο ειδικές γραμμομοριακές θερμότητες είναι

- 21 Ποιες από τις επόμενες προτάσεις είναι σωστές;
- α) Στα στερεά και τα υγρά, η ειδική θερμότητα εξαρτάται μόνο από το υλικό τους. Στα αέρια η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα εξαρτάται κάθε φορά από τον τρόπο με τον οποίο θερμαίνεται το αέριο.
 - β) Ο λόγος C_p/C_v , των γραμμομοριακών ειδικών θερμοτήτων ενός αερίου είναι μεγαλύτερος ή ίσος με τη μονάδα.
 - γ) Στα ιδανικά αέρια $C_p C_v = \text{σταθερό}$
 - δ) Η σχέση $\Delta U = n C_v \Delta T$, δίνει τη μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας ενός αερίου σε κάθε μεταβολή, αντιστρεπτή ή μη.
- 22 Η θερμοκρασία μιας ποσότητας αερίου αυξάνεται. Η εσωτερική ενέργεια του αερίου :
- α) αυξάνεται;
 - β) μειώνεται;
 - γ) δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή στη θερμοκρασία;
 - δ) χρειάζονται και άλλα στοιχεία για να απαντήσουμε;

Επιλέξτε τη σωστή απάντηση.

23 Εξηγήστε ποιοτικά γιατί η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα των αερίων υπό σταθερή πίεση είναι μεγαλύτερη από τη γραμμομοριακή ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο.

24 Πού οφείλονται οι αποκλίσεις ανάμεσα στις θεωρητικές προβλέψεις των C_p και C_v για το μοντέλο του ιδανικού αερίου και στις πειραματικές τιμές τους;

Δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος Θερμικές μηχανές

25 Θερμική μηχανή είναι,

- α) το τρόλεϊ;**
 - β) ο φούρνος;**
 - γ) το ποδήλατο;**
 - δ) ο κινητήρας του αεροπλάνου;**
- Επιλέξτε τη σωστή απάντηση.**

26 Με ποιον τρόπο αποβάλλεται θερμότητα κατά τη λειτουργία της μηχανής του αυτοκινήτου;

27 Ποια από τις επόμενες προτάσεις είναι σωστή;

- α) Κάθε θερμική μηχανή λειτουργεί ανάμεσα σε δύο θερμοκρασίες.**
- β) Ο συντελεστής απόδοσης μιας θερμικής μηχανής είναι το πηλίκο της ωφέλιμης ενέργειας που μας δίνει η μηχανή προς το ποσό θερμότητας που αποβάλλεται από τη μηχανή κατά τη λειτουργία της.**
- γ) Εάν ήταν δυνατό να εξαλειφθούν οι τριβές ο συντελεστής απόδοσης των θερμικών μηχανών θα ήταν ίσος με τη μονάδα.**
- δ) Η απόδοση των θερμικών μηχανών κυμαίνεται συνήθως ανάμεσα στο 70 με 80%.**

28 Οι παρακάτω προτάσεις αναφέρονται στο δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο. Ποιες είναι σωστές;

- α) Δεν υπάρχουν περιορισμοί στη μετατροπή της ενέργειας από τη μια μορφή στην άλλη.**
- β) Η θερμότητα ποτέ δε μετασχηματίζεται πλήρως σε μηχανική ενέργεια.**

γ) Κατά την ισόθερμη εκτόνωση, όλο το ποσό θερμότητας που απορροφά το αέριο μετατρέπεται σε έργο. Η μεταβολή αυτή αποτελεί μια εξαίρεση στο δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο.

δ) Με τη σημερινή τεχνολογία δεν έχει επιτευχθεί η πλήρης μετατροπή της θερμότητας σε μηχανικό έργο. Ελπίζουμε ότι στο μέλλον θα το κατορθώσουμε.

ε) Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος αποκλείει την ύπαρξη μιας θερμικής μηχανής που έχει συντελεστή απόδοσης ίσο με 1.

στ) Το ψυγείο μεταφέρει θερμότητα από τα ψυχρά σώματα προς τα θερμότερα.

ζ) Η θερμότητα μεταφέρεται πάντα από τα θερμότερα προς τα ψυχρότερα σώματα. Για το αντίστροφο απαιτείται δαπάνη ενέργειας.

29 Λέμε ότι κατά τη λειτουργία μιας θερμικής μηχανής το ωφέλιμο έργο είναι πάντα μικρότερο από την ενέργεια που δαπανάται για τη λειτουργία της (θερμότητα). Μήπως αυτό παραβιάζει την αρχή διατήρησης της ενέργειας; Αιτιολογήστε την απάντησή σας.

30 Η θάλασσα έχει τεράστια εσωτερική ενέργεια. Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε αυτή την ενέργεια για την κίνηση των πλοίων; (Δικαιολογήστε την απάντησή σας).

31 Ποιες από τις παρακάτω προτάσεις που αφορούν στη μηχανή Carnot είναι σωστές;

α) Η μηχανή που επινόησε και συναρμολόγησε ο Carnot φέρει σήμερα το όνομα του.

β) Ο κύκλος του Carnot αποτελείται από δύο ισόθερμες και δύο ισόχωρες μεταβολές.

γ) Η μηχανή Carnot έχει τη μεγαλύτερη απόδοση γιατί μετατρέπει εξ ολοκλήρου τη θερμότητα σε ωφέλιμο έργο.

δ) Η απόδοση της μηχανής Carnot εξαρτάται μόνο από τις θερμοκρασίες των δεξαμενών υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας.

ε) Όταν μικραίνει ο λόγος της θερμοκρασίας της ψυχρής δεξαμενής προς τη θερμοκρασία της θερμής, σε μια μηχανή Carnot, ο συντελεστής απόδοσής της μεγαλώνει.

32 Η απόδοση μιας θερμικής μηχανής δε μπορεί να είναι από την απόδοση μιας μηχανής Carnot που λειτουργεί ανάμεσα στις ίδιες θερμοκρασίες. Ο συντελεστής απόδοσης μιας μηχανής Carnot είναι (Συμπληρώστε τα κενά).

Εντροπία

33 Ποιες από τις επόμενες προτάσεις είναι σωστές;

α) Η σχέση $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$, δίνει τη μεταβολή της εντροπίας μόνο στις πολύ μικρές αντιστρεπτές διεργασίες.

β) Η μεταβολή της εντροπίας ενός θερμοδυναμικού συστήματος εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική κατάσταση του συστήματος και όχι από τον τρόπο που έγινε η μεταβολή.

γ) Στη διάρκεια μιας πραγματικής (μη αντιστρεπτής) διεργασίας η εντροπία ενός μονωμένου θερμοδυναμικού συστήματος μειώνεται.

δ) Σε ένα μονωμένο σύστημα σε ισορροπία η εντροπία έχει τη μέγιστη τιμή της.

34 Ένα θερμοδυναμικό σύστημα μεταβαίνει από την κατάσταση A στην κατάσταση B. Η εντροπία του συστήματος στην κατάσταση B είναι μεγαλύτερη από την εντροπία του στην κατάσταση A ($S_B > S_A$).

Επιλέξτε τις σωστές απαντήσεις στα ερωτήματα A, B, Γ.

A. Η αταξία των δομικών στοιχείων του συστήματος είναι

- α) μεγαλύτερη στην κατάσταση B.
- β) μικρότερη στην κατάσταση B.
- γ) δεν έχουμε επαρκή στοιχεία για να απαντήσουμε.

B. Η ικανότητα του συστήματος να παράγει ωφέλιμο έργο

- α) αυξήθηκε με τη μετάβαση του συστήματος στην κατάσταση B,
- β) μειώθηκε,
- γ) δεν έχουμε επαρκή στοιχεία για να απαντήσουμε.

Γ. Το σύστημα κατά τη διάρκεια της μεταβολής

- α) απορρόφησε θερμότητα,
- β) απέβαλε θερμότητα στο περιβάλλον,
- γ) δεν έχουμε επαρκή στοιχεία για να απαντήσουμε.

35 Ένα βλήμα σφηνώνεται σε τοίχο.

- α) Η κινητική ενέργεια του βλήματος μετατράπηκε σε δυναμική.
- β) Μετά την κρούση η κινητική ενέργεια του βλήματος μηδενίστηκε. Η εσωτερική ενέργεια του βλήματος και της περιοχής του τοίχου όπου σφηνώθηκε αυξήθηκε.

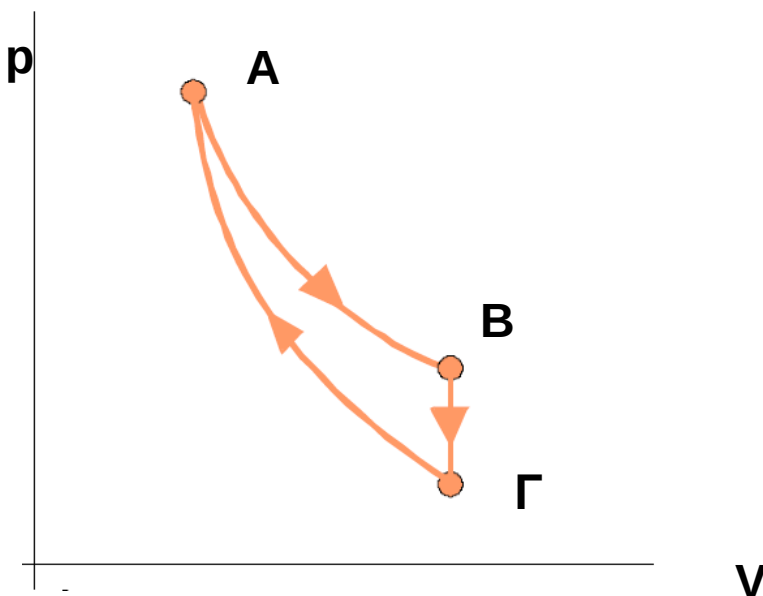
γ) Η εντροπία του συστήματος βλήμα τοίχος μειώθηκε.

δ) Η ικανότητα του συστήματος για παραγωγή ωφέλιμου έργου μειώθηκε.

Ποιες από τις προηγούμενες προτάσεις είναι σωστές;

36 Αν βάλουμε ένα ποτήρι νερό στην κατάψυξη, το νερό θα παγώσει. Η αταξία των μορίων του νερού σ' αυτή την κατάσταση (πάγος) έχει μειωθεί σε σχέση με εκείνη που υπήρχε όταν το νερό βρισκόταν στην υγρή κατάσταση. Επομένως η εντροπία του νερού μειώθηκε. Μήπως αυτή η περίπτωση αποτελεί εξαίρεση στην γενικότερη τάση να αυξάνεται η εντροπία; Δικαιολογήστε την άποψή σας.

37



Σχ. 4.40

Στο σχήμα 4.40 παριστάνεται η κυκλική μεταβολή που υφίσταται ορισμένη ποσότητα αερίου. Η μεταβολή AB είναι ισόθερμη, η BΓ ισόχωρη και η ΓΑ αδιαβατική. Κατά τη μεταβολή BΓ, η εντροπία του αερίου

α) αυξάνεται;

β) μειώνεται;

γ) παραμένει σταθερή;

Αιτιολογήστε την απάντησή σας.

38 Να αντιστοιχίσετε τα μεγέθη που βρίσκονται στην αριστερή στήλη με τις μονάδες μέτρησης στη δεξιά στήλη

1) W

2) S

3) U

4) p

5) V

α) J

β) m^3

γ) N

δ) N/m^2

ε) J/K

39 Να αποδοθεί ο κύκλος Carnot σε διάγραμμα με άξονες την εντροπία και την απόλυτη θερμοκρασία του αερίου (ST).

ΑΣΚΗΣΕΙΣ

Έργο αερίου – πρώτος θερμοδυναμικός νόμος

40 Αέριο με όγκο $0,004 \text{ m}^3$ θερμαίνεται με σταθερή πίεση $p=1,2 \text{ atm}$ μέχρι ο όγκος του να γίνει $0,006 \text{ m}^3$. Υπολογίστε το έργο που παράγει το αέριο. Δίνεται $1 \text{ atm}=1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$.

[Απ : 243,1 J]

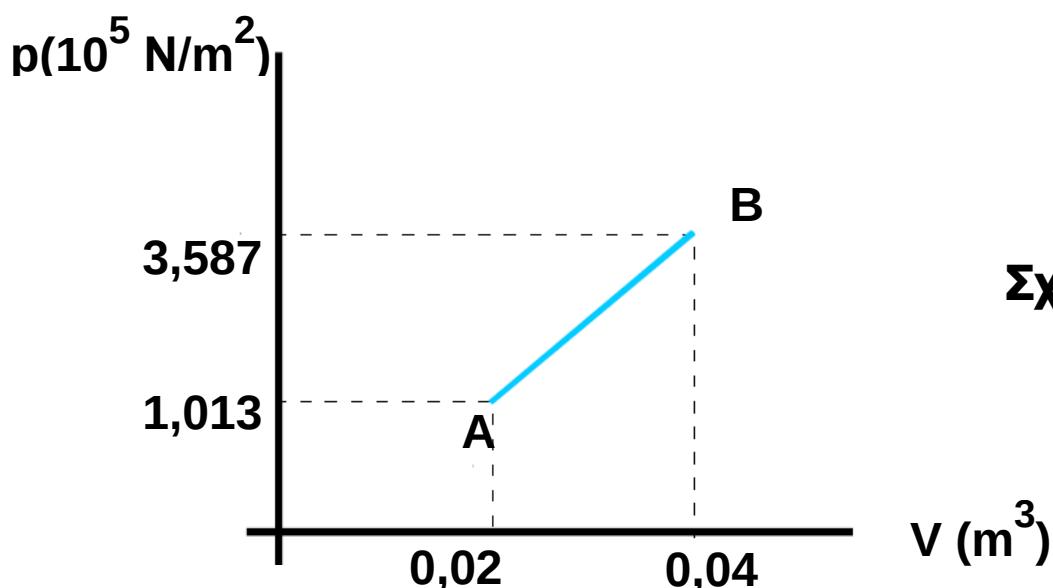
41 Δύο mol αερίου θερμαίνονται από τους 27°C στους 127°C . Η θέρμανση του αερίου γίνεται με σταθερή πίεση. Υπολογίστε το έργο που παράγει το αέριο. Δίνεται $R=8,314 \text{ J/(mol K)}$.

[Απ : 1663 J]

42 Δύο mol αερίου βρίσκονται σε θερμοκρασία 27°C . Διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία συμπιέζουμε το αέριο ώστε η πίεσή του να διπλασιαστεί. Να υπολογιστεί το έργο του αερίου. Δίνονται $R=8,314 \text{ J/(mol K)}$, $\ln 2=0,6931$.

[Απ : 3458 J]

43



Σχ. 4.41

Το διάγραμμα (σχ. 4.41) παριστάνει τη μεταβολή ενός αερίου από την κατάσταση Α στην κατάσταση Β. Υπολογίστε το έργο του αερίου κατά τη μεταβολή αυτή.

[Απ : 4600 J]

44 Ποσότητα αερίου καταλαμβάνει όγκο 10 L και έχει πίεση 1 atm. Το αέριο θερμαίνεται ισόθερμα μέχρι να διπλασιαστεί ο όγκος του. Υπολογίστε το ποσό θερμότητας που απορρόφησε το αέριο. Δίνονται $1\text{L}=10^{-3}\text{ m}^3$, $1\text{atm}=1,013\times 10^5\text{ N/m}^2$, $\ln 2=0,6931$.

[Απ : $Q=702,1\text{ J}$]

45 Αέριο βρίσκεται μέσα σε δοχείο που κλείνεται με έμβολο. Το αέριο καταλαμβάνει όγκο $V_1=0,008\text{ m}^3$, έχει θερμοκρασία $T_1=300\text{ K}$ και πίεση $p_1=1,013\times 10^5\text{ N/m}^2$. Θερμαίνουμε το αέριο υπό σταθερή πίεση, μέχρι η θερμοκρασία του να γίνει $T_2=375\text{ K}$.

α) Υπολογίστε το έργο του αερίου.

β) Αν κατά τη θέρμανσή του το αέριο απορρόφησε θερμότητα $Q=709,1\text{ J}$ υπολογίστε τη μεταβολή της εσωτερικής του ενέργειας.

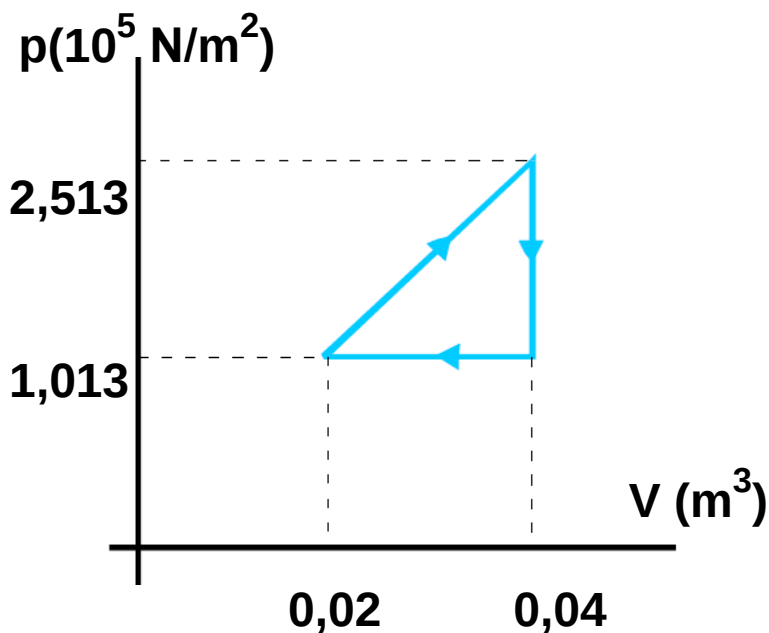
[Απ : $W=202,6\text{ J}$, $\Delta U=506,5\text{ J}$]

46 0,2 mol αερίου συμπιέζονται ισόθερμα σε θερμοκρασία $\theta=27^\circ\text{C}$, ώστε ο όγκος του να ελαττωθεί στο μισό. Υπολογίστε το ποσό θερμότητας που αντάλλαξε το αέριο με το περιβάλλον.

Δίνονται $R=8,314\text{ J/(mol K)}$, $\ln 2=0,6931$.

[Απ : 345,8J]

47 Αέριο εκτελεί την κυκλική μεταβολή του σχήματος 4.42. Υπολογίστε το καθαρό ποσό θερμότητας που απορρόφησε.



Σχ. 4.42

[Απ : 1500J]

Γραμμομοριακές ειδικές θερμότητες ιδανικού αερίου

48 Ιδανικό αέριο βρίσκεται σε δοχείο σταθερού όγκου $0,004 \text{ m}^3$. Το αέριο θερμαίνεται ώστε η πίεσή του από $1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ να γίνει $3,213 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. Να υπολογιστεί το ποσό θερμότητας που απορρόφησε το αέριο. Δίνεται ότι στα ιδανικά αέρια ισχύει $C_V = 3/2 R$.

[Απ : 1320J]

49 Αέριο θερμαίνεται με σταθερή πίεση $1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, ώστε ο όγκος του από $0,005 \text{ m}^3$ να γίνει $0,007 \text{ m}^3$. Να υπολογιστεί το ποσό θερμότητας που απορρόφησε το αέριο. Δίνεται $C_V = 3/2 R$.

[Απ : 506,5 J]

50 Να υπολογιστεί η αύξηση της εσωτερικής ενέργειας ορισμένης ποσότητας αερίου όταν το θερμάνουμε με σταθερή πίεση προσφέροντάς του θερμότητα $Q = 10 \text{ cal}$. Για το αέριο ισχύει $\gamma = 1.41$.

Δίνεται $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$.

[Απ : 29,64 J]

Θερμικές μηχανές Κύκλος Carnot

51 Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ένα εργοστάσιο χρησιμοποιεί λιγνίτη. Από την καύση του λιγνίτη το εργοστάσιο τροφοδοτείται με θερμότητα με ρυθμό 900 MW και παράγει 300 MW μηχανικής ισχύος που, στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ. Υπολογίστε την απόδοση του εργοστασίου κατά τη μετατροπή της θερμότητας σε μηχανική ενέργεια.

[Απ : 33,3 %]

52 Θερμική μηχανή παράγει σε κάθε κύκλο λειτουργίας της μηχανικό έργο 200 J. Η απόδοση της μηχανής είναι 25%. Υπολογίστε το ποσό θερμότητας που απορροφά, καθώς και το ποσό θερμότητας που αποβάλλει η μηχανή σε κάθε κύκλο της.

[Απ : 800 J, 600 J]

53 Οι βενζινομηχανές στα αυτοκίνητα χρησιμοποιούν τη θερμότητα που παράγεται από την καύση της βενζίνης. Μέρος της θερμότητας αυτής τη μετατρέπουν σε μηχανικό έργο και την υπόλοιπη την αποβάλλουν στην ατμόσφαιρα. Η απόδοση μιας τέτοιας μηχανής είναι περίπου 20%. Η θερμοκρασία που επιτυγχάνεται με την καύση της βενζίνης είναι περίπου 2100 °C. Αν η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας είναι 23°C, υπολογίστε τη θεωρητικά μέγιστη απόδοση που μπορεί να έχει μία τέτοια μηχανή. (Θα θεωρήσετε ότι τα καυσαέρια αποβάλλονται στη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας).

[Απ : 87%]

54 Μια μηχανή Carnot υποβάλλει σε κυκλική μεταβολή 5 mol ιδανικού αερίου. Η θερμοκρασία της θερμής δεξαμενής είναι 500 K και της ψυχρής 300 K. Κατά την ισόθερμη εκτόνωσή του ο όγκος του αερίου από $V_A = 3 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ γίνεται $V_B = 6 \times 10^{-2} \text{ m}^3$. Υπολογίστε:

α) Το συντελεστή απόδοσης της μηχανής.

β) Το έργο που παράγει η μηχανή σε κάθε κύκλο.

Δίνονται $R=8,314 \text{ J/(mol K)}$, $\ln 2=0,693$.

[Απ : 0,4, 5762 J]

Εντροπία

55 Ποσότητα αερίου καταλαμβάνει όγκο 4L, με πίεση 2atm, και θερμοκρασία 400 K. Το αέριο ψύχεται με σταθερό όγκο μέχρι η πίεσή του να γίνει 0,8 atm και στη συνέχεια θερμαίνεται με σταθερή πίεση μέχρι ο όγκος του να γίνει 10 L.

α) Να αποδοθούν οι μεταβολές αυτές σε διάγραμμα pV .

β) Να υπολογιστεί η τελική θερμοκρασία του αερίου.

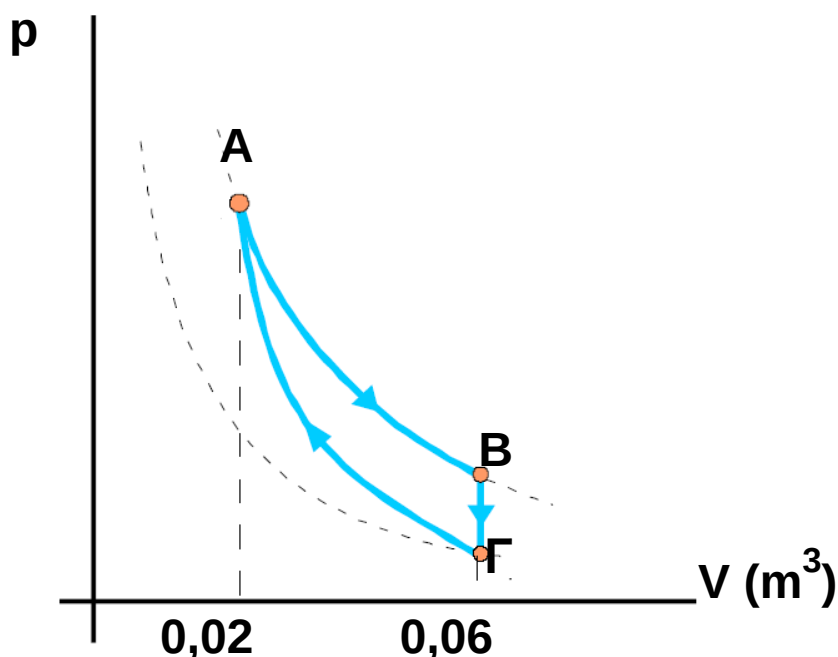
γ) Να υπολογιστεί η μεταβολή της εντροπίας του.

Δίνονται $1\text{L} = 10^{-3} \text{ m}^3$ και $1\text{atm} = 1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$,

$\ln 2,5=0,9163$.

[Απ : 400 K, $\Delta S=1,86 \text{ J/K}$]

56



Σχ. 4.43

Ποσότητα αερίου $n=0,2 \text{ mol}$ υφίσταται την κυκλική μεταβολή του σχήματος 2.43, όπου AB ισόθερμη εκτόνωση,

ΒΓ ισόχωρη ψύξη, ΓΑ αδιαβατική συμπίεση. Να υπολογιστεί η μεταβολή της εντροπίας του αερίου στις επιμέρους μεταβολές ΑΒ, ΒΓ και ΓΑ.
Δίνεται $R=8,314 \text{ J/(mol K)}$, $\ln 3=1,0986$.

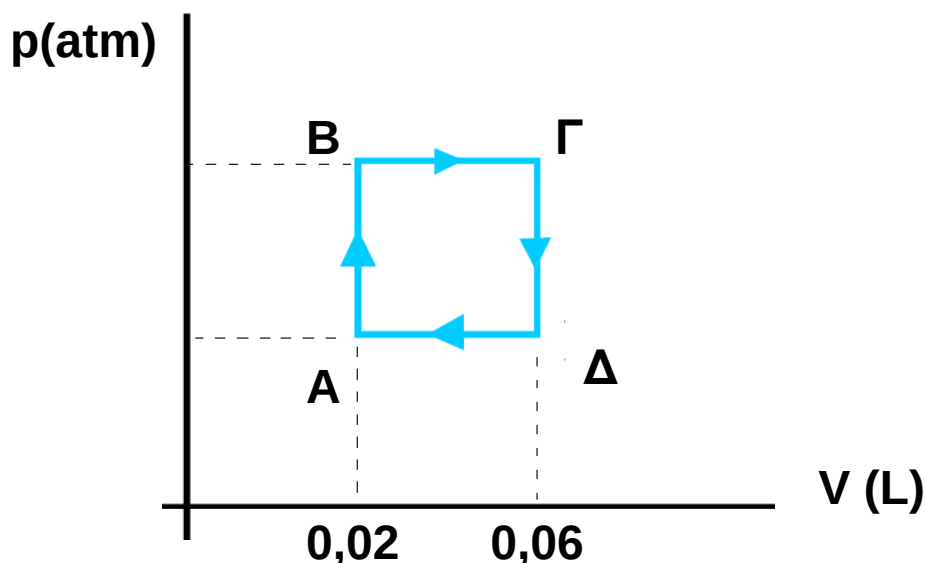
$$[\text{ΑΠ} : \Delta S_{AB} = 1,83 \text{ J/K}, \Delta S_{BG} = 1,83 \text{ J/K}, \Delta S_{GA}=0]$$

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

57 Ποσότητα αερίου βρίσκεται μέσα σε κύλινδρο και καταλαμβάνει όγκο V . Το αέριο εκτονώνεται μέχρι να διπλασιαστεί ο όγκος του. Η εκτόνωση του αερίου μπορεί να γίνει με ισόθερμη ή με αδιαβατική ή με ισοβαρή μεταβολή.

- α) Να παρασταθούν γραφικά σε διάγραμμα pV οι τρεις μεταβολές που μπορούν να οδηγήσουν το αέριο από την αρχική του κατάσταση στην τελική.
- β) Σε ποια από τις τρεις μεταβολές :
 - i) Το αέριο παράγει περισσότερο έργο;
 - ii) Το αέριο απορροφά το μικρότερο ποσό θερμότητας;

58



Σχ. 4.44

Το σχήμα 4.44 δείχνει τη γραφική παράσταση της σχέσης $p=f(V)$, όπου p , V η πίεση και ο όγκος ενός mol ιδανικού αερίου. Να γίνει για την ίδια κυκλική μεταβολή

η γραφική παράσταση των σχέσεων $p=f(T)$ και $V=f(T)$, όπου T η απόλυτη θερμοκρασία, και να υπολογιστεί το έργο που παράγεται από το αέριο κατά την κυκλική μεταβολή ΑΒΓΔ. Δίνονται $1\text{atm}=1,013\times 10^5\text{ N/m}^2$, $1\text{ L}=10^{-3}\text{ m}^3$.

[Απ : 2269 J]

59 Κυλινδρικό δοχείο έχει τον άξονά του κατακόρυφο και κλείνεται, στο επάνω μέρος του, με έμβολο βάρους w και εμβαδού A , έτσι ώστε το αέριο που περιέχει να έχει όγκο V . Το αέριο θερμαίνεται έτσι ώστε η θερμοκρασία του, από θ , να γίνει θ' . Να υπολογιστεί το έργο που παράγεται από το αέριο. Η θέρμανση γίνεται σε χώρο όπου η ατμοσφαιρική πίεση είναι $p_{\text{ατ}}$.

$$[\text{Απ} : W=V\left(p_{\text{ατ}}+\frac{w}{A}\right)\times\left(\frac{\theta'-\theta}{273+\theta}\right)]$$

60 Κυλινδρικό δοχείο με αδιαβατικά τοιχώματα έχει τον άξονά του κατακόρυφο και κλείνεται με έμβολο πάνω στο οποίο βρίσκονται διάφορα σταθμά. Στο δοχείο περιέχεται $V_1=1\text{m}^3$ υδρογόνου, σε θερμοκρασία $\theta_1=27^\circ\text{C}$ και πίεση $p_1=125\times 10^5\text{ N/m}^2$. Αφαιρώντας σταθμά κάνουμε την πίεση ίση με $p_2=10^5\text{ N/m}^2$ (ατμοσφαιρική πίεση). Να υπολογιστούν :

α) Ο όγκος και η θερμοκρασία του αερίου στην τελική κατάσταση.

β) Το έργο που παράχθηκε κατά την εκτόνωσή του. Θεωρήστε κατά προσέγγιση $\gamma=3/2$.

[Απ : α) 25m^3 , $T=60\text{K}$,

β) $W=2\times 10^7\text{ J}$]

61 Μια ποσότητα ιδανικού αερίου που αποτελείται από $N=1,5\times 10^{24}$ μόρια, βρίσκεται σε θερμοκρασία

$\theta_A=27^\circ\text{C}$. Θερμαίνουμε το αέριο μέχρι η θερμοκρασία του να γίνει $\theta_B=127^\circ\text{C}$ i) με σταθερό όγκο και ii) με σταθερή πίεση. Να υπολογιστούν σε κάθε περίπτωση:

α) Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του αερίου.

β) Το έργο που παράγει το αέριο.

γ) Η θερμότητα που προσφέρουμε στο αέριο.

Δίνονται: $R=8,314 \text{ J/(mol K)}$, $N_A=6,023 \times 10^{23}$ μόρια/mol.

[Απ : i) 3106,2 J, 0, 3106,2 J

ii) 3106,2 J, 2070,8 J, 5177 J]

62 Η θερμοκρασία της θερμής δεξαμενής σε μια μηχανή Carnot είναι $\theta_1=127^\circ\text{C}$ και της ψυχρής $\theta_2=27^\circ\text{C}$.

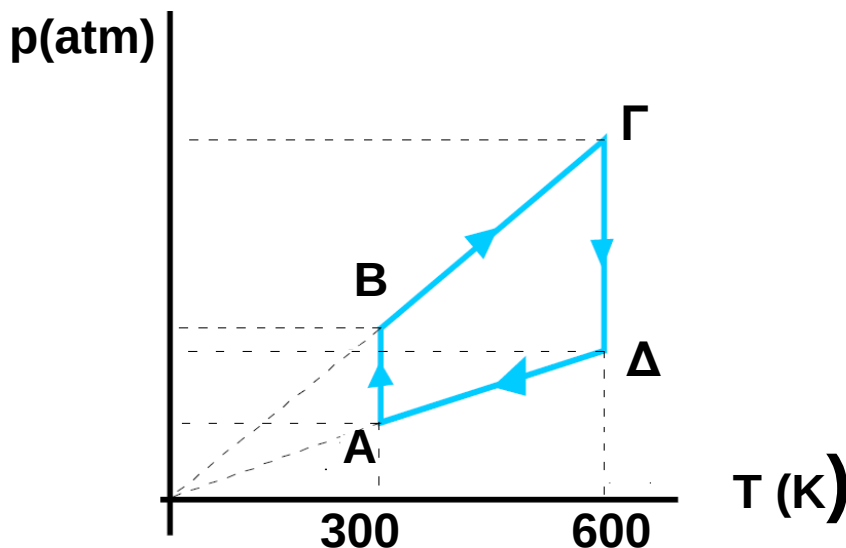
α) Να υπολογιστεί ο συντελεστής απόδοσης της μηχανής.

β) Αν η μηχανή αποδίδει ισχύ $P=10\text{HP}$ να υπολογιστεί το ποσό της θερμότητας που απορροφά από τη δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας σε χρόνο $t=1\text{h}$.

Δίνεται $1\text{HP}=745,7\text{W}$.

[Απ : 0,25, 29,828 kWh]

63



Σχ. 4.45

Ιδανική θερμική μηχανή λειτουργεί με τον αντιστρεπτό κύκλο του σχήματος 4.45.

α) Να παρασταθεί γραφικά η κυκλική μεταβολή σε άξονες VT και pV.

β) Να υπολογιστεί το έργο που παράγει η μηχανή στη διάρκεια ενός κύκλου.

γ) Να υπολογιστεί ο συντελεστής απόδοσης της μηχανής.

Δίνονται : η ποσότητα του αερίου $n=0,975\text{mol}$, $C_V=3R/2$, $R=8,314\text{J}/(\text{mol K})=0,082\text{ L atm}/(\text{mol K})$, $\ln 2,5=0,9163$.

[Απ : β) 2228,3J, γ) 0,275]

64 Ένα ιδανικό αέριο εκτελεί την κυκλική μεταβολή ΑΒΓΔΑ όπου ΑΒ ισόθερμη εκτόνωση, ΒΓ ισόχωρη ψύξη, ΓΔ ισοβαρή ψύξη, ΔΑ ισόχωρη θέρμανση. Αν είναι $p_A=6\text{atm}$, $V_A=22,4\text{L}$, $T_A=546\text{K}$, $V_B=3V_A$, $T_\Gamma = 273\text{K}$.

α) Να αποδοθεί γραφικά η παραπάνω μεταβολή σε άξονες pV , pT , VT .

β) Να υπολογιστεί το έργο που παράγεται από το αέριο κατά τη διάρκεια αυτής της μεταβολής.

Δίνονται $\ln 3=1,1$ $1\text{L atm} = 101\text{J}$.

[Απ : 10407 J]

65 Ένα mol ιδανικού αερίου φέρεται από την κατάσταση Α ($p_0 V_0$) στην κατάσταση Β($2p_0, 2V_0$) με δυο τρόπους:

α) Με μια ισόθερμη και μια ισοβαρή μεταβολή.

β) Με μια ισόθερμη και με μια ισόχωρη μεταβολή.

Να υπολογιστούν τα Q και W σε κάθε περίπτωση.

Δίνονται τα p_0 , V_0 , $\ln 2=0,6931$, $C_V=3R/2$.

[Απ : α) $6,8p_0V_0$, $2,3 p_0V_0$ β) $5,2p_0V_0$, $0,7p_0V_0$]

66 Η κυκλική μεταβολή του ιδανικού αερίου μιας θερμικής μηχανής αποτελείται από: α) μια ισόχωρη θέρμανση μέχρι να τριπλασιαστεί η πίεσή του. β) μια ισοβαρή εκτόνωση μέχρι να τριπλασιαστεί ο όγκος του, γ) μια ισόχωρη ψύξη μέχρι να αποκτήσει την αρχική πίεση και, δ) μια ισοβαρή συμπίεση μέχρι την αρχική

του κατάστασης. Να υπολογιστεί ο συντελεστής απόδοσης της μηχανής. Δίνεται $\gamma=5/3$.

[Απ : 2/9]

67 Ένα mol ιδανικού αερίου, που βρίσκεται σε s.t.p θερμαίνεται με σταθερή πίεση μέχρι να διπλασιαστεί ο όγκος του και μετά ψύχεται με σταθερό όγκο μέχρι να υποδιπλασιαστεί η πίεσή του. Να υπολογιστούν:

α) Το έργο που παράχθηκε.

β) Η θερμότητα που ανταλλάχθηκε με το περιβάλλον.

γ) Η μεταβολή της εντροπίας του αερίου.

Δίνονται: $R=8,314 \text{ J/(mol K)}$, $\ln 2=0,693$, $1 \text{ atm}=101,4 \text{ J}$.

[Απ : α) 2271 J β) 2271 J

γ) 5,76 J/K]

68 Ένα mol ιδανικού αερίου, που βρίσκεται σε s.t.p. συμπιέζεται αδιαβατικά μέχρι η πίεσή του να γίνει 8 atm και μετά ψύχεται με σταθερό όγκο μέχρι η πίεσή του να γίνει 4 atm. Να υπολογιστούν για κάθε μεταβολή του αερίου και για τη συνολική μεταβολή του:

α) Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας, του αερίου.

β) Η μεταβολή της εντροπίας του.

Δίνονται: $R=8,314 \text{ J/(mol K)}$ και $\ln 2=0,6931$. Θεωρήστε ότι για το αέριο $\gamma=3/2$ και $C_V=16,628 \text{ J/(mol K)}$.

[Απ : α) 4539,5 J, 4539,5 J, 0, β) 0, 11,52 J/K, 11,52 J/K]

69 Ιδανικό αέριο έχει όγκο $V_A=0,04 \text{ m}^3$, πίεση $p_A=3 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ και θερμοκρασία $T_A=600 \text{ K}$. Το αέριο εκτονώνεται ισόθερμα μέχρι ο όγκος του να γίνει $V_B=0,16 \text{ m}^3$, ύστερα ψύχεται με σταθερό όγκο ώσπου να αποκτήσει την κατάλληλη πίεση από όπου μια αδιαβατική συμπίεση

θα το φέρει στην αρχική του κατάσταση. Να υπολογιστούν :

α) Η εσωτερική ενέργεια του αερίου στην αρχική του κατάσταση, καθώς και στο τέλος της ισόθερμης και της ισόχωρης μεταβολής.

β) Το έργο που παράγεται κατά την κυκλική μεταβολή

γ) Η μεταβολή της εντροπίας στις επιμέρους μεταβολές.

Δίνονται: $R=8,314 \text{ J/(mol K)}$, $\gamma=5/3$, $\ln 4=1,386$
 $(0,25)^{\gamma}=0,0992$.

[Απ : 18000J , 18000J , 7200J , 5832J , $27,72\text{J/K}$, 0 , $27,72\text{J/K}$]

70 Κυλινδρικό δοχείο, με αδιαβατικά τοιχώματα, έχει τον άξονά του κατακόρυφο, και κλείνεται στο επάνω μέρος του με αδιαβατικό έμβολο εμβαδού $A=10\text{cm}^2$ και μάζας $m=10 \text{ kg}$. Ο κύλινδρος περιέχει ιδανικό αέριο και βρίσκεται σε χώρο όπου η εξωτερική πίεση είναι $p_{at}=1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. Μέσω μιας αντίστασης R που βρίσκεται μέσα στο δοχείο το αέριο θερμαίνεται αργά. Αν το ποσό θερμότητας που προσφέρεται μέσω της αντίστασης είναι $Q=50\text{J}$ να υπολογιστεί:

α) Η μετατόπιση του εμβόλου.

β) Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του αερίου.

Δίνονται: $g=10\text{m/s}^2$, $C_v=3R/2$.

[Απ : $0,1\text{m}$, 30 J]

71 Η κυκλική μεταβολή του ιδανικού αερίου μιας θερμικής μηχανής αποτελείται από μια ισόχωρη ψύξη AB, μια ισοβαρή ψύξη BΓ και τέλος τη μεταβολή ΓΑ, κατά τη διάρκεια της οποίας η πίεση και ο όγκος συνδέονται με τη σχέση $p=600+400V \text{ (SI)}$. Όλες οι μεταβολές θεωρούνται αντιστρεπτές. Αν στις

καταστάσεις Α και Γ το αέριο έχει όγκο $V_A=2\text{m}^3$ και $V_\Gamma=1\text{m}^3$, αντίστοιχα,

- α) Να υπολογιστεί το έργο που παράγεται σε ένα κύκλο.
- β) Να υπολογιστεί ο συντελεστής απόδοσης της μηχανής.
- γ) Να καθοριστεί αν αυξάνεται η ελαττώνεται η εντροπία του αερίου για κάθε μια από τις επιμέρους μεταβολές.

Υπενθυμίζεται ότι στα ιδανικά αέρια ισχύει $C_V/R=3/2$.

[Απ : 200 J, 0,051]

72 Η κυκλική μεταβολή $n=2/R$ mol ιδανικού αερίου σε μια θερμική μηχανή αποτελείται από τη μεταβολή ΑΒ, κατά τη διάρκεια της οποίας η πίεση και ο όγκος

συνδέονται με τη σχέση $p=-\frac{2}{3}\times 10^8 V+6\times 10^5$ (SI), τη ΒΓ,

που είναι ισοβαρής, και τέλος τη ΓΑ, που είναι ισόχωρη. Το αέριο στις καταστάσεις Α και Β έχει όγκο $V_A=6\times 10^{-3}\text{m}^3$ και $V_B=3\times 10^{-3}\text{m}^3$, αντίστοιχα. Να

υπολογιστεί:

- α) Ο συντελεστής απόδοσης της μηχανής.
- β) Η μεταβολή της εντροπίας στις μεταβολές ΑΒ και ΓΑ.

Δίνονται: $C_V=3R/2$, $\Delta S_{B\Gamma}=2,3$ J/K και $\ln 2=0,7$.

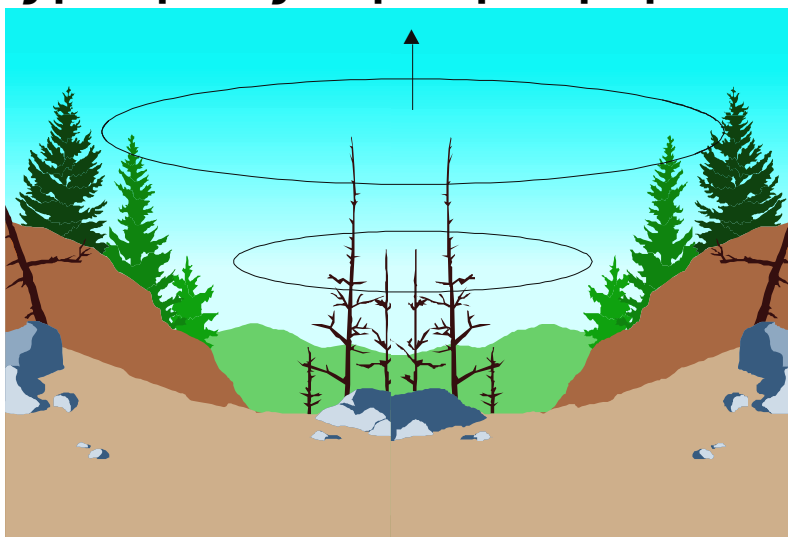
[Απ : 0,1 , 1,4 J/K, 0,9 J/K]



ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΟΥ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ

Στις αδιαβατικές μεταβολές δε γίνεται ανταλλαγή θερμότητας ανάμεσα στο σύστημα και το περιβάλλον. Πρακτικά, για να θεωρηθεί αδιαβατική η μεταβολή κάποιου αερίου που περιέχεται σε δοχείο θα πρέπει ή το δοχείο να είναι μονωμένο ή η μεταβολή να πραγματοποιείται ταχύτατα ώστε το αέριο να μην προλάβει να ανταλλάξει θερμότητα με το περιβάλλον.

Αδιαβατικές μεταβολές συμβαίνουν και στον ατμοσφαιρικό αέρα, δημιουργώντας αυξομειώσεις στη θερμοκρασία του. Πρόκειται για ένα από τα φαινόμενα που λαμβάνουν υπόψη τους οι μετεωρολόγοι όταν μελετούν τις μεταβολές στην ατμόσφαιρα.



Σχ. 4.46 Ποσότητα θερμού αέρα ανεβαίνοντας υφίσταται αδιαβατική εκτόνωση.

Ας θεωρήσουμε την ποσότητα θερμού αέρα έκτασης πολλών τετραγωνικών χιλιομέτρων που βρίσκεται πάνω από μια κοιλάδα (σχ. 4.46). Η ποσότητα αυτή δεν περικλείεται από αδιαβατικά τοιχώματα αλλά, λόγω του μεγάλου όγκου της, παρά το γεγονός ότι τα περιφερειακά στρώματα αναμιγνύονται με αέρα διαφορετικής θερμοκρασίας και πίεσης, το σύνολο της ποσότητας παραμένει ανεπηρέαστο από το περιβάλλον. Η συνολική

ποσότητα, δηλαδή, συμπεριφέρεται σα να περικλείεται από σάκο με αδιαβατικά τοιχώματα.

Έστω ότι ο αέρας αυτός αρχίζει να ανεβαίνει. Αυτό μπορεί να συμβεί αν βρεθεί σε ψηλότερη θερμοκρασία από τα υπερκείμενα στρώματα οπότε η πυκνότητά του θα είναι μικρότερη από αυτή των υπερκείμενων στρωμάτων.

Η πίεση του ατμοσφαιρικού αέρα ελαττώνεται με το ύψος από την επιφάνεια της Γης. Αυτό σημαίνει ότι ο όγκος της ποσότητας στην οποία αναφερόμαστε αυξάνεται και επειδή δεν ανταλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον, η εκτόνωση μπορεί να θεωρηθεί αδιαβατική. Σε μια αδιαβατική εκτόνωση η θερμοκρασία του αερίου μειώνεται.

Έχει διαπιστωθεί ότι όταν τέτοιες μάζες αέρα ανεβαίνουν κατά 1 km η θερμοκρασία τους ελαττώνεται κατά 10 °C. Άρα, αν μια θερμή μάζα αέρα του θεσσαλικού κάμπου, θερμοκρασίας 30° C, ανέβει κατά 3 km, όσο είναι περίπου το ύψος του παρακείμενου Ολύμπου, στην κορυφή του θα έχει θερμοκρασία 0° C. Έτσι εξηγείται γιατί στα βουνά η θερμοκρασία είναι χαμηλή σε αντίθεση με τη θερμοκρασία στις πεδιάδες.



Εικ. 4.15 Οι κορυφές του Ολύμπου μένουν χιονισμένες συνήθως σ' όλη τη διάρκεια του χρόνου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ 2ου τόμου

3.	Κινητική θεωρία αερίων.....	5
	3-1 Εισαγωγή.....	6
	3-2 Νόμοι αερίων.....	9
	3-3 Καταστατική εξίσωση.....	13
	3-4 Κινητική θεωρία.....	18
	3-5 Τα πρώτα σημαντικά αποτελέσματα.....	20
	3-6 Κατανομή μοριακών ταχυτήτων.....	29
	3-7 Τα συμπεράσματα της κινητικής θεωρίας έχουν ευρύτερη εφαρμογή.....	36
	Σύνοψη.....	41
	Δραστηριότητες.....	43
	Ερωτήσεις.....	45
	Ασκήσεις.....	51
	Προβλήματα.....	54
	Ένθετο. Η ενεργός ταχύτητα των μορίων του αερίου είναι μεγαλύτερη της μέσης (απόδειξη).....	57
	Ένθετο. Γιατί δεν υπάρχει υδρογόνο στην ατμόσφαιρα της Γης.....	58
4.	Θερμοδυναμική.....	62
	4-1 Εισαγωγή.....	63
	4-2 Θερμοδυναμικό σύστημα.....	64
	4-3 Ισορροπία Θερμοδυναμικού συστήματος.....	64
	4-4 Αντιστρεπτές μεταβολές.....	66
	4-5 Έργο παραγόμενο από αέριο κατά τη διάρκεια μεταβολών όγκου.....	70

4-6 Θερμότητα	72
4-7 Εσωτερική ενέργεια	73
4-8 Πρώτος θερμοδυναμικός Νόμος.....	76
4-9 Εφαρμογή του Πρώτου Θερμοδυναμικού Νόμου σε ειδικές περιπτώσεις	78
4-10 Γραμμομοριακές Ειδικές Θερμότητες αερίων	85
4-11 Θερμικές μηχανές.....	91
4-12 Δεύτερος θερμοδυναμικός Νόμος	104
4-13 Η μηχανή του CARNOT.....	106
4-14 Εντροπία	110
4-15 Υπολογισμός της μεταβολής της εντροπίας σε μερικές περιπτώσεις	117
Σύνοψη	123
Δραστηριότητες.....	128
Ερωτήσεις	130
Ασκήσεις	145
Προβλήματα.....	150
Ένθετο. Αδιαβατικές μεταβολές του ατμοσφαιρικού αέρα	157

Βάσει του ν. 3966/2011 τα διδακτικά βιβλία του Δημοτικού, του Γυμνασίου, του Λυκείου, των ΕΠΑ.Λ. και των ΕΠΑ.Σ. τυπώνονται από το ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ και διανέμονται δωρεάν στα Δημόσια Σχολεία. Τα βιβλία μπορεί να διατίθενται προς πώληση, όταν φέρουν στη δεξιά κάτω γωνία του εμπροσθόφυλλου ένδειξη «ΔΙΑΤΙΘΕΤΑΙ ΜΕ ΤΙΜΗ ΠΩΛΗΣΗΣ». Κάθε αντίτυπο που διατίθεται προς πώληση και δεν φέρει την παραπάνω ένδειξη θεωρείται κλεψίτυπο και ο παραβάτης διώκεται σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 7 του νόμου 1129 της 15/21 Μαρτίου 1946 (ΦΕΚ 1946,108, Α').

Απαγορεύεται η αναπαραγωγή οποιουδήποτε τμήματος αυτού του βιβλίου, που καλύπτεται από δικαιώματα (copyright), ή η χρήση του σε οποιαδήποτε μορφή, χωρίς τη γραπτή άδεια του Υπουργείου Παιδείας, Θρησκευμάτων και Αθλητισμού / ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ.